机电系统专题实验

Mechatronic Systems Special Experiment

自主小车嵌入式软件框架与编程实现

任课教师：

尹文生　副教授
yinws@tsinghua.edu.cn

胡金春　副研究员
hujinchun@tsinghua.edu.cn

为什么嵌入式编程?

- 运行速度慢（时钟：72M?——对比：3G以上）
- 硬件资源少（存储：64K整型——对比：8G以上）
- 可用资源少（函数：专用库——对比：控件多）
- 编程工具少（语言：C——对比：傻瓜式语言多）
- 无操作系统（硬件：独占、自由——对比：共享，框架）
- ....

应用需求 → 求知方向

课程内容

- 认识嵌入式编程过程
- 一般嵌入式编程变量管理
- 车控系统软件建议框架
- 车轮转速控制实现
- PID控制律参数与调试

课程内容

- 认识嵌入式编程过程
- 一般嵌入式编程变量管理
- 车控系统软件建议框架
- 车轮转速控制实现
- PID控制律参数与调试

嵌入式编程过程：预处理、编译、汇编和链接

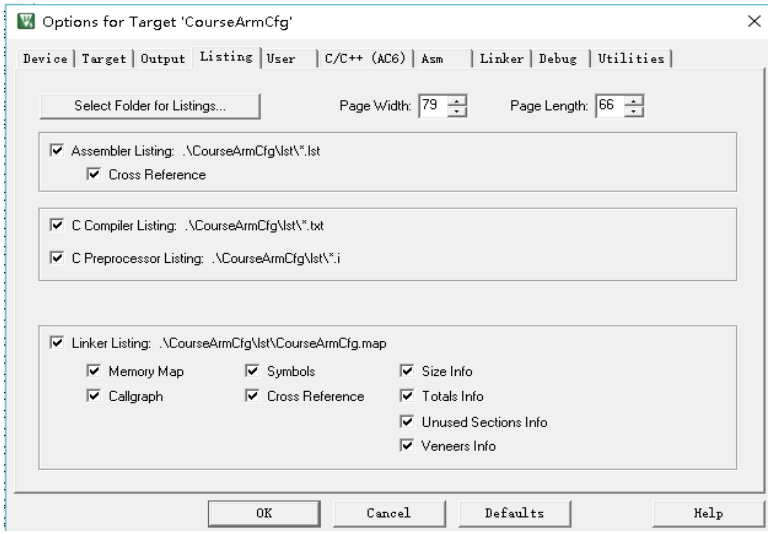
通过4个过程生成可执行代码，通过仿真器与集成开发环境帮助下下载并运行。

预处理：展开所有宏定义，删除所有“#define”；处理所有条件编译指令：“#if”、“#ifdef”、“#elif”、“#else”、“#endif”；处理“#include”预编译指令，将被包含文件插入到指令位置，删除所有注释“//”和“/* */”；添加行号和文件名标识，为调试、编译错误或警告做好准备；保留所有编译器需要的 #pragma 编译指令。

编译：利用编译程序从源语言编写的源程序产生目标程序的过程(机器语言)，包括词法分析、语法分析、语义检查、中间代码生成、代码优化、目标代码生成共5个阶段

汇编：用汇编器将汇编代码转换成机器执行的指令，每一个汇编语句几乎都对应一条机器指令。

链接：将各模块相互引用部分正确地衔接起来，包括了地址和空间分配、符号决议和重定向。最基本的链接是将目标文件和库（也是目标文件）一起链接形成最后的可执行文件



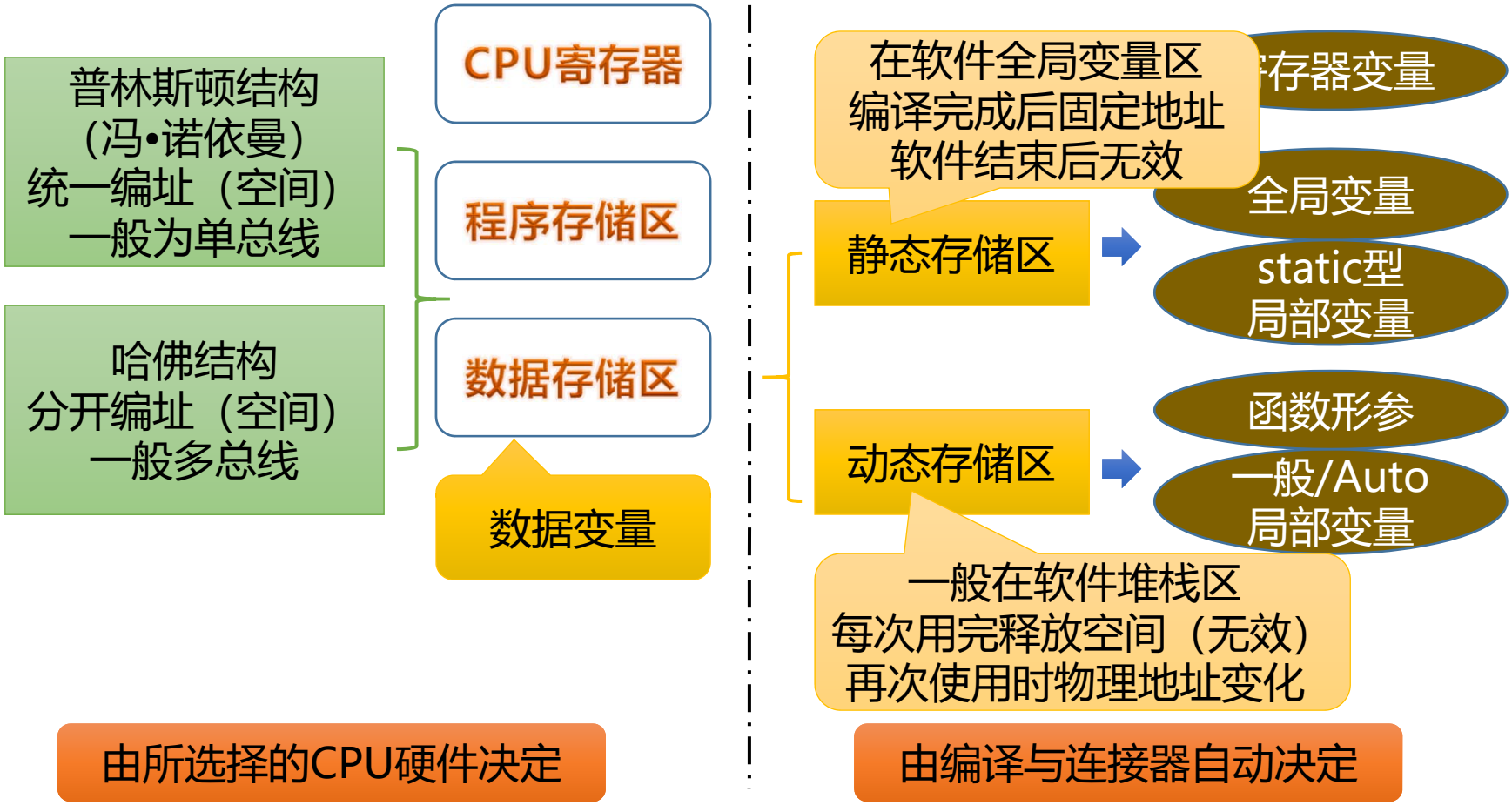
嵌入式编程过程：4过程中文件的变化

课程内容

- 认识嵌入式编程过程
- **认识嵌入式编程变量管理**
- 车控系统软件建议框架
- 车轮转速控制实现
- PID控制律的参数与调试

嵌入式编程变量：C语言几种数据类型

- 动态存储与静态存储



嵌入式编程变量：变量在内存中的占用

- 避免模块之间复制传递
  - 函数参数调用时被复制，增加存储负担与时间成本
- 变量范围与表示
  - 关注变量的表示范围、符号，避免表示溢出
  - 根据CPU实际支持数值类型与位数合理确定变量类型：8位51单片机尽可能使用char（有符号）与unsigned char(无符号)变量，float变量计算极其费CPU时间
- 连续运算可能导致编译器错误编译（并不提示）
  - 如将k=a*b*c*d替换为k1=a*b; k2=c*d; k=k1*k2
- 嵌入式CPU存储空间较小，避免越界带来的程序“乱窜”
  - 注意数组所定义空间大小
  - 合理分配堆栈空间大小
  - 注意实际使用内存空间大小

尽可能定义较少全局与局部变量：较少的变量，不会致空间不够

尽可能使用全局变量：全局变量区域较大，编译器会越界检查；堆栈区较小，编译器难以检查，越界后果难料

合理组织全局变量与软件框架：提高全局变量利用率同时避免耦合

嵌入式编程变量：表示范围与溢出

- 一般地：char: 8Bits, -128~+127, unsigned char: 8Bits, 0~+255
- 不同编译器变量表示字节数与范围不同，实际使用前应首先测试确认

  VarSize = sizeof(unsigned char)
- 不是所有编译器支持所有常用变量类型：如在32位DSP上实际用16Bits表示char

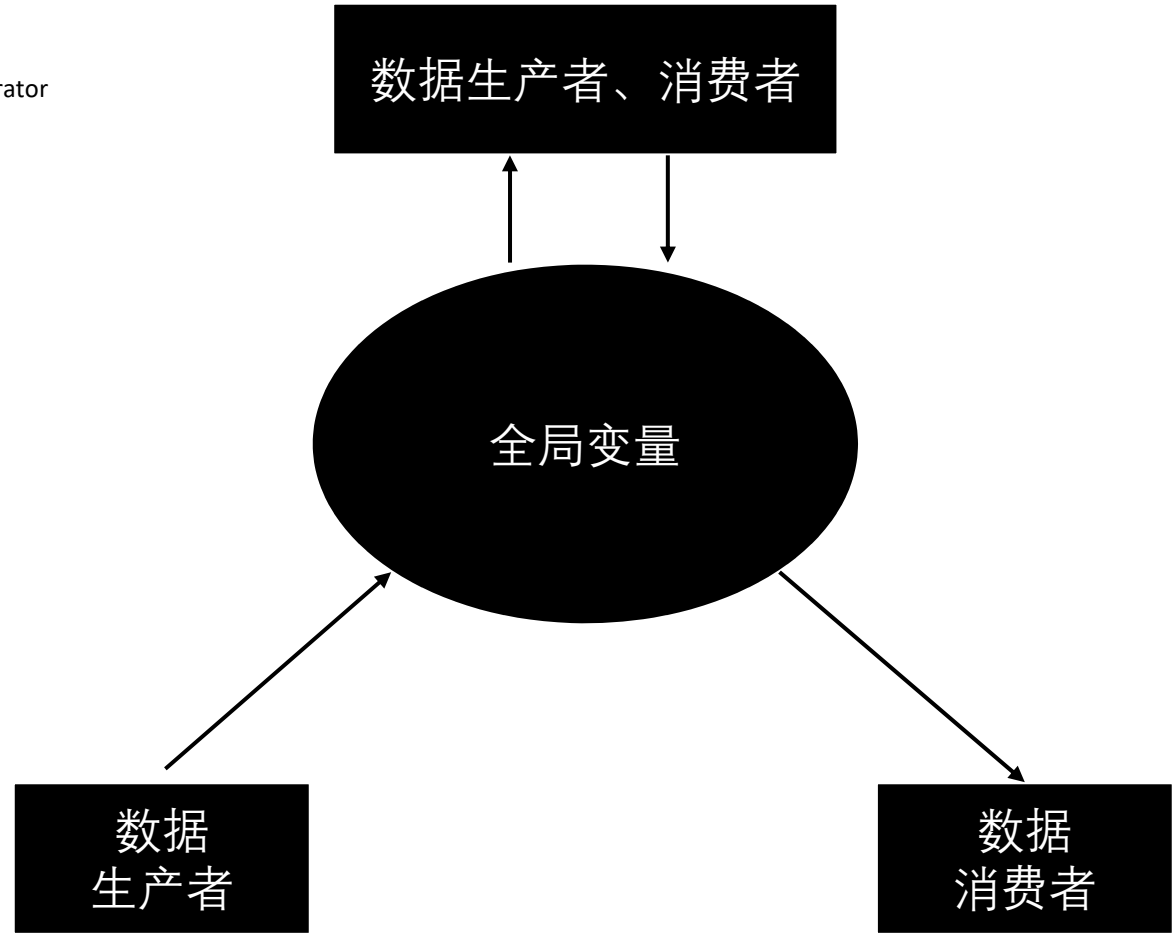
  DSP28338: char(2Bytes), float(4Bytes), VC: char(1Byte) float(4Bytes)

  STm32: uint8_t(1Bytes)
- 如变量超过表示范围，则溢出导致不可预测后果：如10*100赋予char，结果可能是-8。

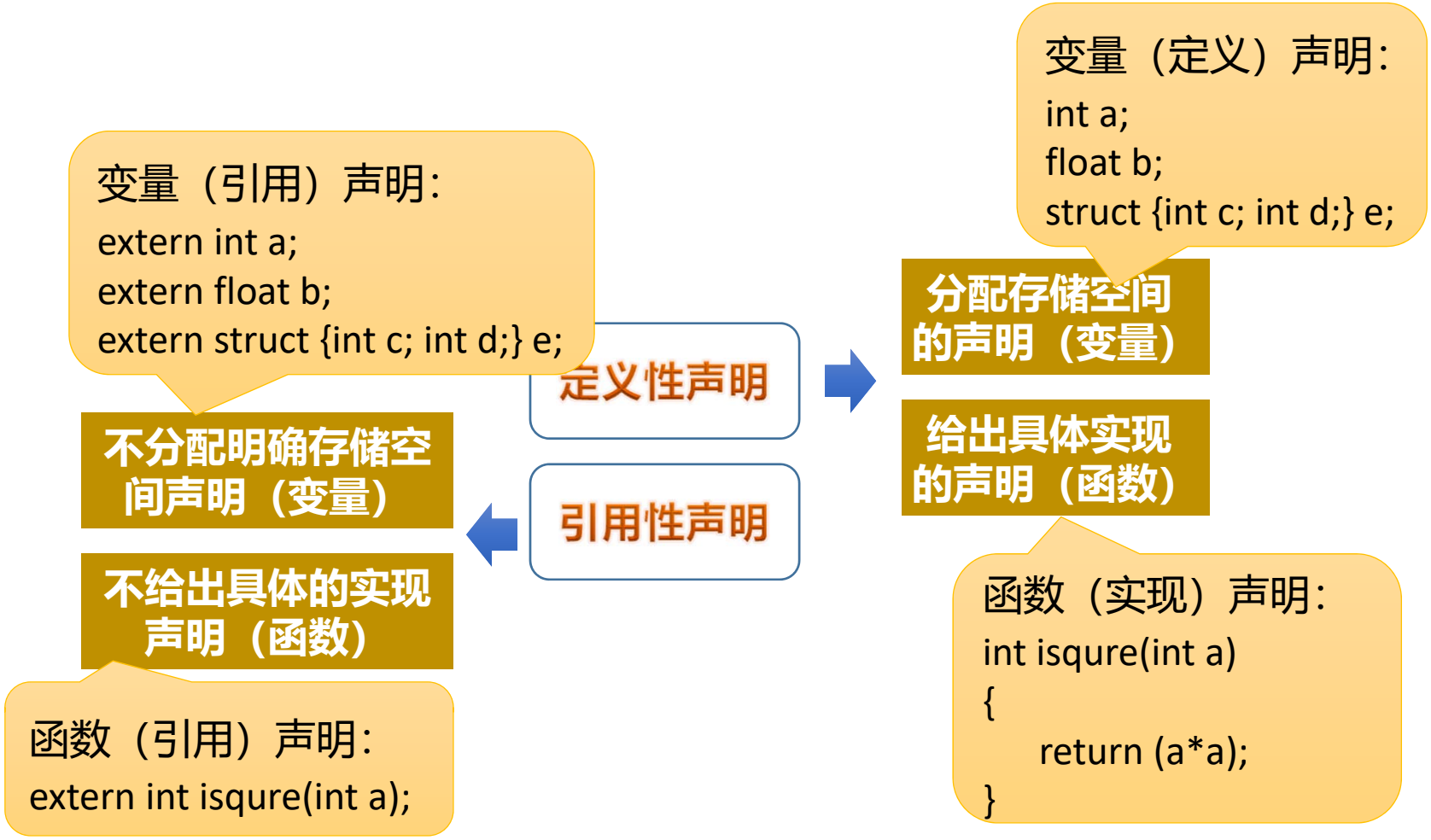
  解决方法：1）设计时考虑变量表示范围；2）使用前限制范围；3）其他数据类型转换

嵌入式编程变量：全局变量应用模型

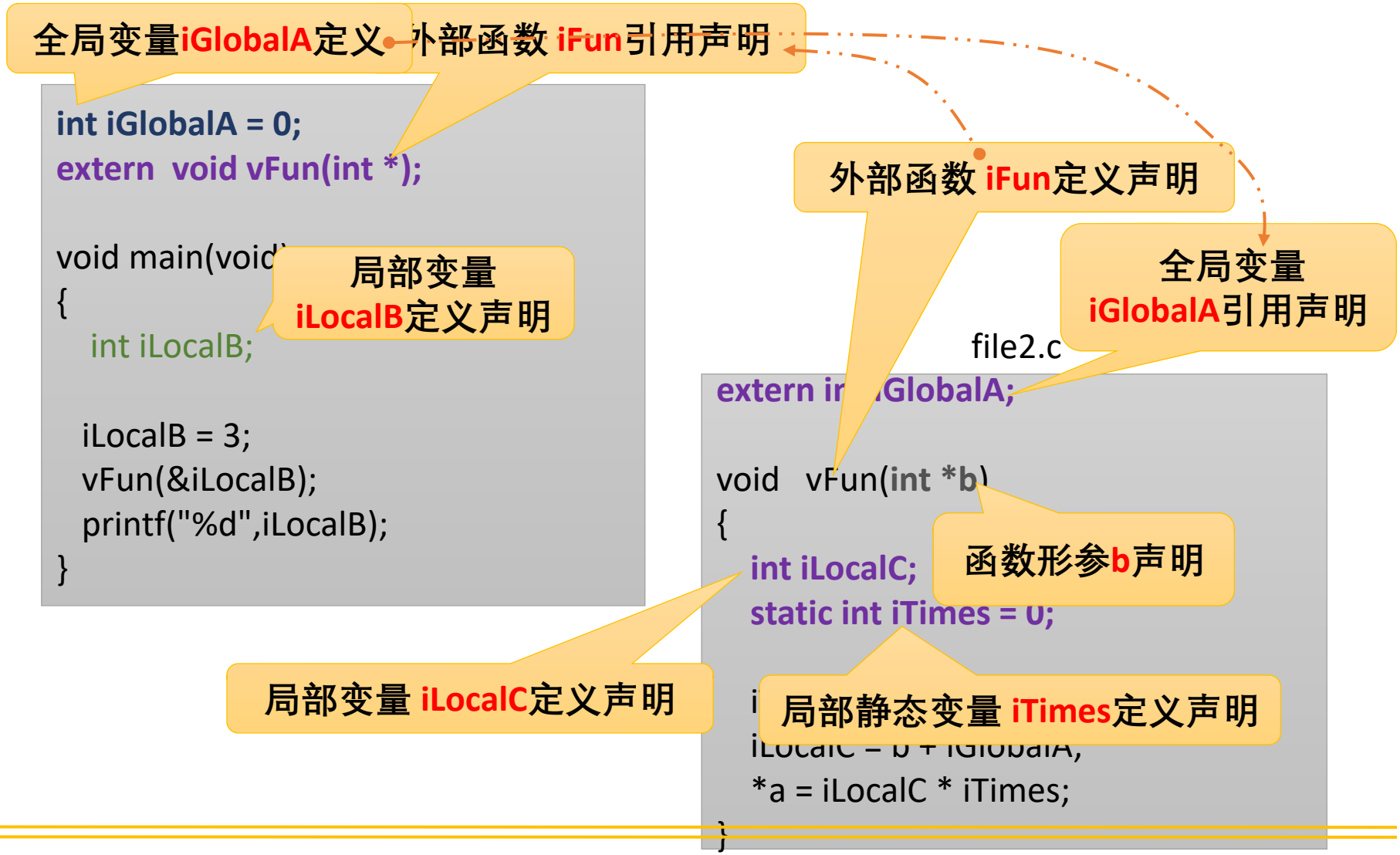
```
typedef struct
{
        int iSetRSpd;//expect speed for speed code
        int iChkRSpd;//rotate speed from speed code
        int iPwmDTm;//time parameter for PWM generator
}STRN_MOTOR_IO;

typedef struct
{
        STRN_MOTOR_IO  LH;
        STRN_MOTOR_IO  LF;
        STRN_MOTOR_IO  RH;
        STRN_MOTOR_IO  RF;
}STRN_MOTOR;

typedef struct
{
        uint8 cCtrMode;
        uint8 cCntLogic;
        uint8 cTimes;
        uint8 cNoUsed;
}STRN_SYS;

typedef struct
{
        unsigned char cGrayVal[128];
        int iOffset;
}STRN_LMCCD;
```



嵌入式编程变量：函数与变量定义与引用



嵌入式编程变量：两个C文件实例



嵌入式编程变量：结构体数据类型

- **结构体**
  - 一组有机的数据整体
  - 在内存中一般连续存放
  - 没定义新数据，只是便于操作有机数据
  - 定义：结构体名，成员类型与名称

```
struct
{
    int a;
    float b;
}Mystr1, *pMystr2;
```

=

```
typedef struct
{
    int a;
    float b;
}MY_STRUCT;
MY_STRUCT Mystr1, *pMystr2;
```

定义?

```
Mystr1.a = 1;
Mystr1.b = 2.54;
pMystr2->a=2;
pMystr2->b=3.78;
```

```
Mystr1=*pMystr2;
```

```
pMystr2=(MY_STRUCT *)alloc(sizeof(MY_STRUCT))
```

嵌入式编程变量：结构体类型数据传递

```
void vCopyMemAsUINT8(UINT8 *src, UINT8 *tgt, UINT8 intsize)
{
        UINT8 idx;
        for(idx=0; idx<intsize; idx++)
        {
                *tgt++ = *src++;
        }
}
```

Mystr1=*pMystr2;

对DSP28335以2Bytes为单位; 对STM32F103 、VC以1Byte为单位;

```
vCopyMemAsUINT8((UINT8 *)pMystr2, (UINT8 * )&Mystr1, sizeof(MY_STRUCT));
```

课程内容

- 认识嵌入式编程过程
- 认识嵌入式编程变量管理
- **车控系统软件建议框架**
- 车轮转速控制实现
- PID控制律的参数与调试

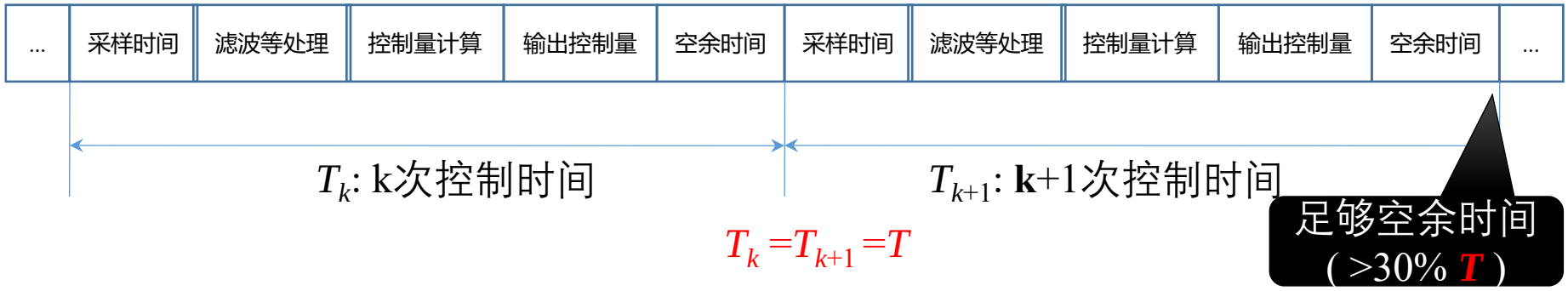
车控系统软件框架：实时控制的一般要求

实时控制要求：

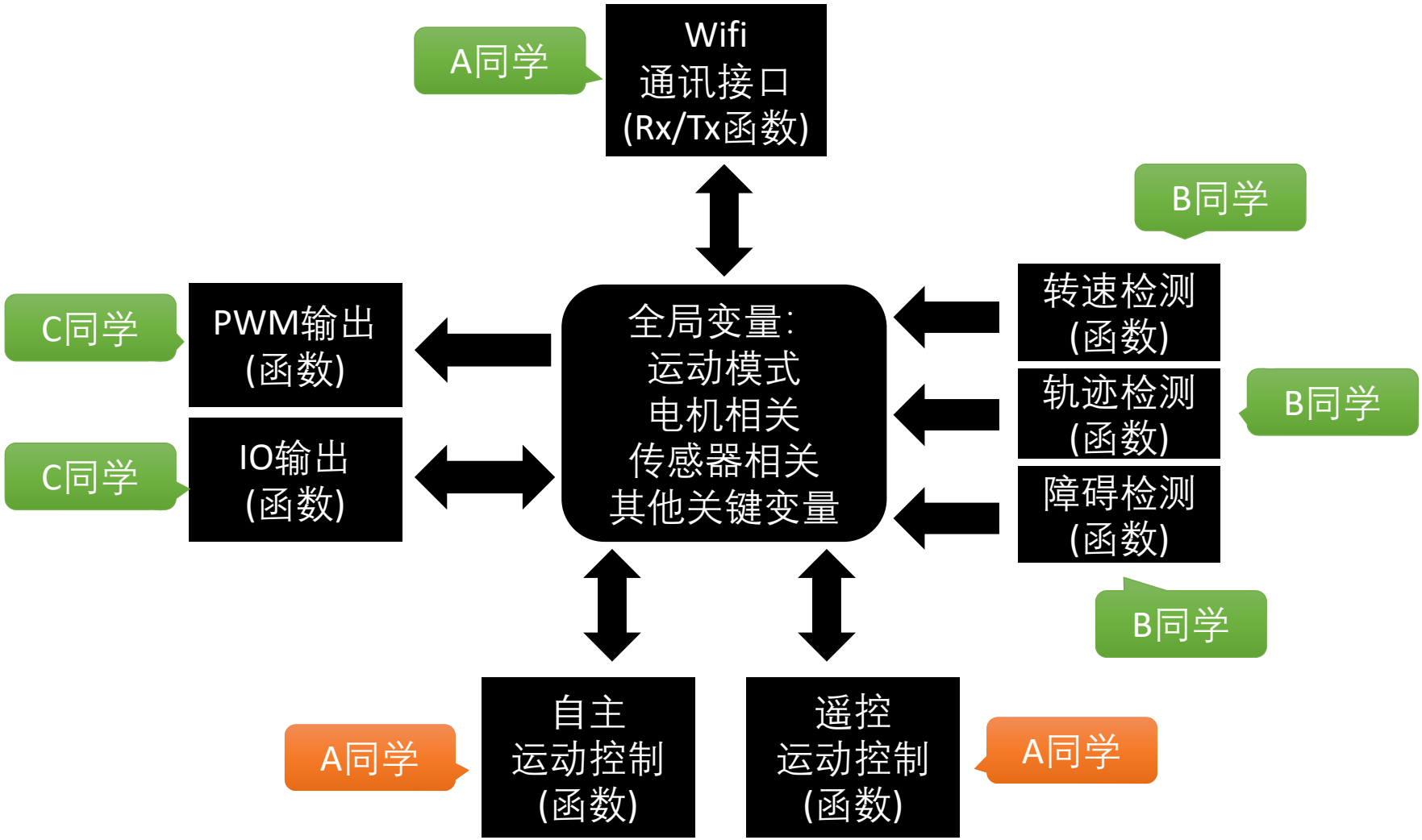
1）准确的控制周期：每次采样、滤波、计算控制量、输出控制量这样完整的一个流程的执行时间及其间隔固定

2）控制频率 f（周期 T 倒数）与控制系统带宽满足香农采样定理：

控制频率至少是控制系统带宽的 2倍，工程上建议 5 倍以上



车控系统软件框架：建议逻辑与分工方法



车控系统软件框架：建议变量定义举例

```
typedef struct
{
        int iSetRSpd;//expect speed for speed code
        int iChkRSpd;//rotate speed from speed code
        int iPwmDTm;//time parameter for PWM generator
}STRN_MOTOR_IO;

typedef struct
{
        STRN_MOTOR_IO  LH;
        STRN_MOTOR_IO  LF;
        STRN_MOTOR_IO  RH;
        STRN_MOTOR_IO  RF;
}STRN_MOTOR;

typedef struct
{
        uint8 cCtrMode;
        uint8 cCntLogic;
        uint8 cTimes;
        uint8 cNoUsed;
}STRN_SYS;

typedef struct
{
        unsigned char cGrayVal[128];
        int iOffset;
}STRN_LMCCD;
```

```
typedef struct
{
        int iGoSpd;//Speed for GoStraight: negetive when go back
        int iTurnSpd;//Speed for Turn: negetive when turn right
}STRN_PCCTRL;

typedef struct
{
        uint32 bObsExit0 : 1;
        uint32 bObsExit1 : 1;
        uint32 cNouse    : 30;
        int iObsDis0;
        int iObsDis1;
}STRN_USONIC;

typedef struct
{
        STRN_SYS    SYS;
        STRN_PCCTRL PCCTRL;
        STRN_MOTOR  MOTOR;
        STRN_LMCCD  LMCCD;
        STRN_USONIC USONIC;
}STRN_UGV;

#define CTRMODE_RC   00//remote control
#define CTRMODE_GT   01//go by trace
#define CTRMODE_AO   02//avoid obstacle

STRN_UGV strUGVar;
```

车控系统软件框架：建议定时的实现H文件

```
#ifndef _MEETIMER_H_
#define _MEETIMER_H_

    typedef unsigned int    u16;
    typedef unsigned long   u32;

    #define TRUE  1
    #define FALSE 0

    extern volatile STRN_SYS_TIMER strSysTimer;
    extern volatile u32 lSystemCnt;

#endif /* MeeTimer.h */
```

这里

```
typedef struct
{
        u16 bTag10us : 1;
        u16 bTag20us : 1;
        u16 bTag50us : 1;
        u16 bTag100us : 1;
        u16 bTag1ms : 1;
        u16 bTag5ms : 1;
        u16 bTag20ms : 1;
        u16 bTag25ms : 1;
        u16 bTag50ms : 1;
        u16 bTag100ms : 1;
        u16 bTag200ms : 1;
        u16 bTag500ms : 1;
        u16 bTag1s : 1;
        u16 bTag1D1s : 1;
        u16 bTag2s : 1;
        u16 bTag2D5s : 1;
}STRN_SYS_TIMER;
```

车控系统软件框架：建议定时实现C文件

找到文件 stm32f1xx_it.c， 在 SysTick_Handler() 函数中添加定时代码

```
#include "MeeTimer.h"
volatile u32 lSystemCnt;
volatile STRN_SYS_TIMER strSysTimer;
void SysTick_Handler(void)
{
        lSystemCnt++; lSystemCnt %= 100000;
        strSysTimer.bTag1ms = TRUE;
        if( lSystemCnt%100 == 99 )  strSysTimer.bTag100ms = TRUE;
        if( lSystemCnt%200 == 199 )  strSysTimer.bTag200ms = TRUE;
        if( lSystemCnt%1000 == 999 )  strSysTimer.bTag1s = TRUE;

        HAL_IncTick();
}
```

车控系统软件框架：建议主程序框架伪码

```
void main()
{
        .....//初始化
        while(1)
        {
                vDetect_UartRx();//来自PC遥控：只改变 strUGVar.STRN_PCCTRL. 成员内容
                if(strSysTimer.bTag10ms==TRUE)
                {
                        vDetect_LMCCD();//CCD函数：  只改变 strUGVar.LMCCD. 成员内容
                        vDetect_USONIC();//超声波函数：  只改变 strUGVar.USONIC. 成员内容
                        strSysTimer.bTag10ms = FALSE;
                }
                if(strSysTimer.bTag50ms==TRUE)
                {
                        switch(strUGVar.SYS.cCtrMode)
                        {
                                case CTRMODE_GT:        vStrategy_GtMode();       break; //go by trace
                                case CTRMODE_AO:        vStrategy_AoMode();  break; //avoid obstacle
                                default:// CTRMODE_RC:  vStrategy_RcMode();  break; //remote control
                        }
                        vControl_MotorPid();
                        vHalExe_PwmGen();
                        strSysTimer.bTag50ms = FALSE;
                }
        }
}
```

车控系统软件框架：建议函数模块-遥控

```
void vDetect_UartRx(void)
{
    static int bStartUp = 1;
    if(bStartUp) { strUGVar.SYS.cCtrMode = CTRMODE_RC; bStartUp = 0; }
    else
    {
        ...//处理自 PC 数据，只改变控制模式 及 strUGVar.STRN_PCCTRL. 成员内容
        ...//即：设定车体的直行与转弯速度
    }
}
```

车控系统软件框架：建议功能模块-遥控

```
void vStrategy_RcMode(void)
{
    //将车体的 设定车速 变换到电机的设定速度，如下面简单代码
    strUGVar.MOTOR.LH.iSetRSpd = strUGVar.PCCTRL.iGoSpd +
                                 strUGVar.PCCTRL.iTurnSpd*2/3;
    //....
}
```

车控系统软件框架：建议功能模块-遥控

```
void vControl_MotorPid(void)
(
    switch(strUGVar.SYS.cCtrMode)
    {
        case CTRMODE_GT://go by trace
        case CTRMODE_AO://avoid obstacle
            //通过电机的设定转速与实际转速差(PID之比例闭环控制)，计算PWM参数
            strUGVar.MOTOR.LH.iPwmDTm
                = Kp * (strUGVar.MOTOR.LH.iSetRSpd - strUGVar.MOTOR.LH.iChkRSpd);
            ...
        break;

        default:// CTRMODE_RC: //remote control
            //由电机设定转速，直接转换到PWM（开环）；也可以用PID实现（闭环）
            strUGVar.MOTOR.LH.iPwmDTm = strUGVar.MOTOR.LH.iSetRSpd;
            ...
        break;
    }
)
```

车控系统软件框架：建议功能模块-PWM

```
void vHalExe_PwmGen(void)
{
    //将前述 PWM 数据转换为 定时器参数，以产生PWM 信号
    //..... = strUGVar.MOTOR.LH.iPwmDTm
}
```

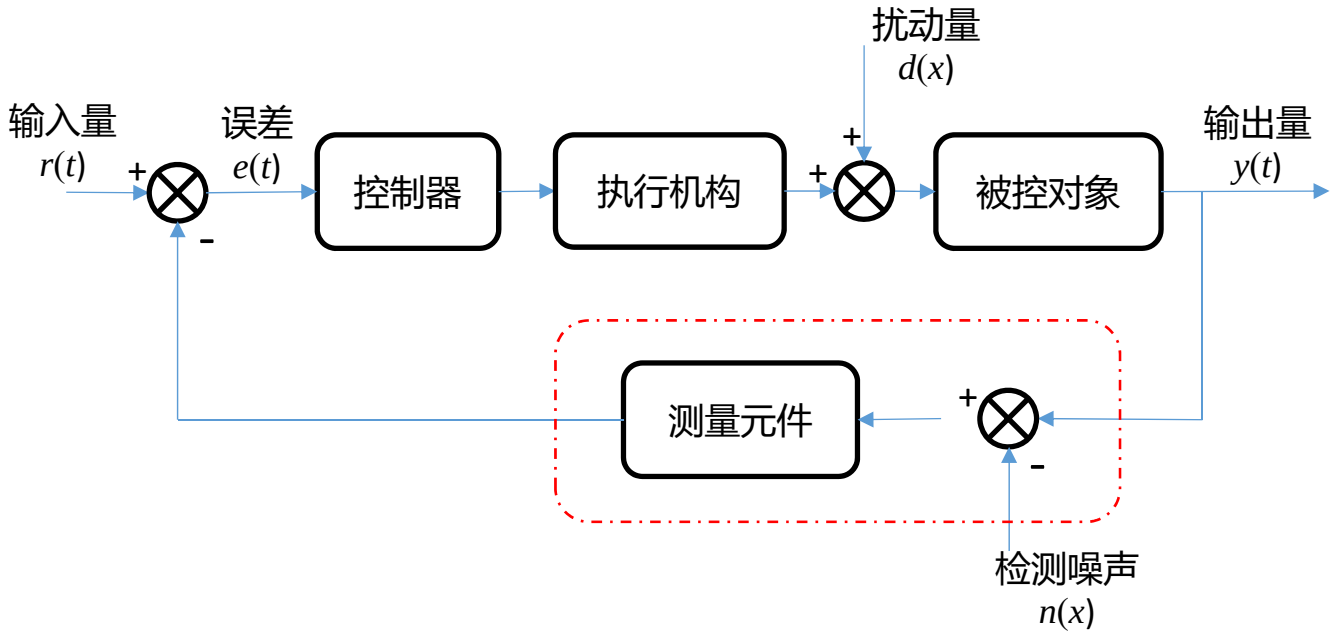
车控系统软件框架：原程序的组织管理

- 模块化原程序
  - 一组具有相对独立功能的程序构成一个原文件(C)
  - 一个源文件(C)内部定义（赋初值）全局变量、定义实现若干函数，声明(用关键字extern)本源文件使用的内部函数，完成相对独立的子功能
  - 一个源文件对应一个头文件(H)，声明对外接口的函数与变量(用关键字extern)，以及宏定义
  - 一个源文件引用其他源文件的函数、变量时，#include对应头文件
- 若干原文件与有关头文件组合成工程(工程+其他配置=project)
- 对工程做相应设置以生成合适可执行文件(HEX/OUT/EXE)

课程内容

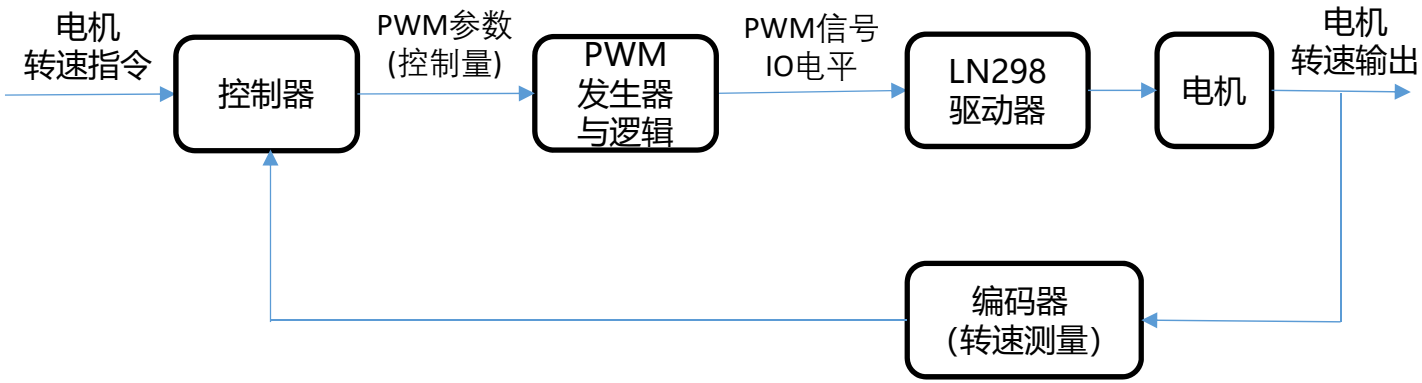
- 认识嵌入式编程过程
- 认识嵌入式编程变量管理
- 车控系统软件建议框架
- **车轮转速控制实现**
- **PID控制律的参数与调试**

车轮转速控制实现：一般闭环控制系统



标准闭环控制系统示意图

车轮转速控制实现：本课程控制对象



车轮转速闭环控制框图

车轮转速控制实现： C编程实现PID算法

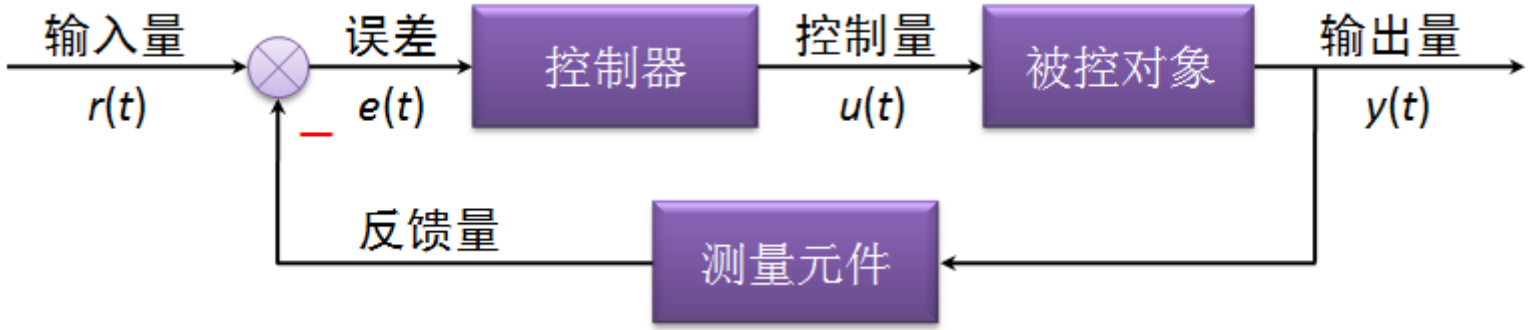
```
typedef struct
{
        int iSetRSpd;//expect speed for speed code
        int iChkRSpd;//rotate speed from speed code
        int iPwmDTm;//time parameter for PWM generator
}STRN_MOTOR_IO;

void vControl_MotorPid(void)
{
        int iCurErr;
        static long iErrSum = 0;
        iErrSum = iErrSum + iCurErr;

         iCurErr = strUGVar.MOTOR.LH.iSetRSpd - strUGVar.MOTOR.LH.iChkRSpd;//误差
        strUGVar.MOTOR.LH.PwmDTm   = iCurErr   * Kp;//P控制
        strUGVar.MOTOR.LH.PwmDTm += iErrSum * Ki;//I控制
        ...
}
```

通过调试，确定的PID控制器参数：Kp,Ki,Kd

课程内容

- 认识嵌入式编程过程
- 认识嵌入式编程变量管理
- 车控系统软件建议框架
- 车轮转速控制实现
- **PID控制律的参数与调试**

PID控制律基本形式



$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t)dt + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

u(k)=Kp*e(k)
+Kd*[e(k)-e(k-1)]
+Ki*[e(k)+e(k-1)+...]

便于计算机实现

比例(Proportional)

积分(Integral)

微分(Differential)

现在

过去

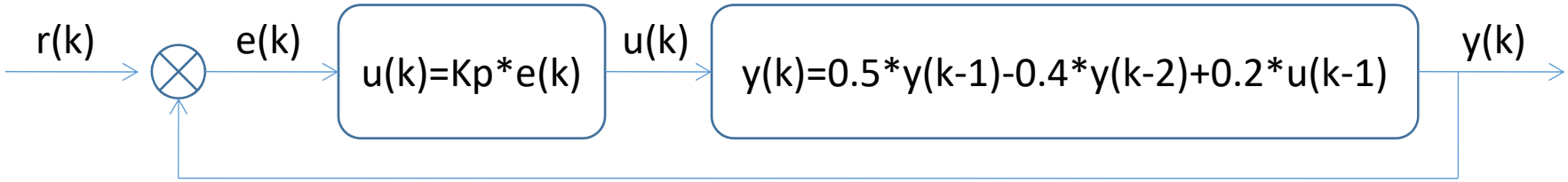
将来

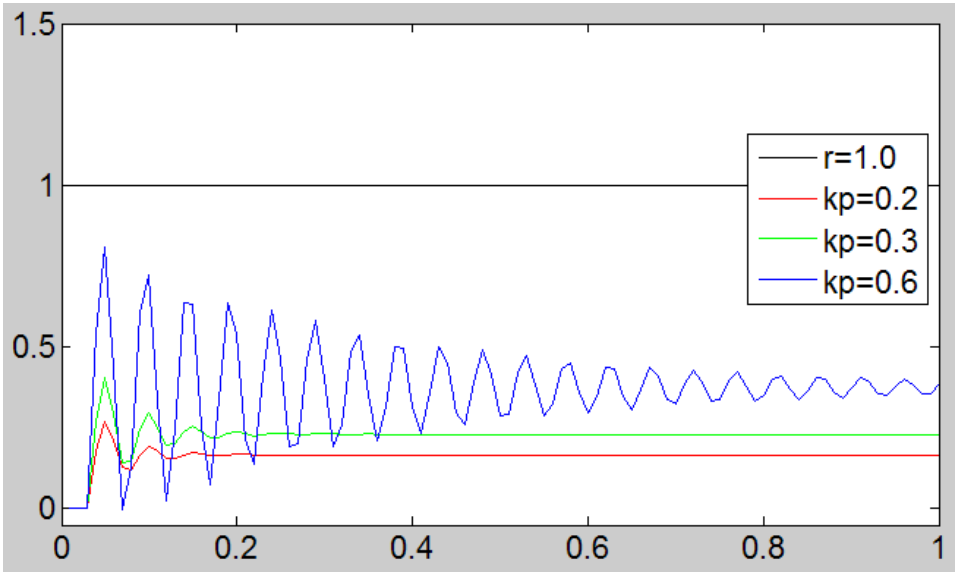
PID控制律中比例增益作用

$$u(t) = K_p e + K_i \int e(t)dt + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

$$e(t) = r(t) - y(t)$$

e(t)变化越大则*u*(t)越大
比例项放大误差，增加输出量跟踪输入量速度





Kp越大:

响应速度越快

稳态误差越小

稳定性变越差

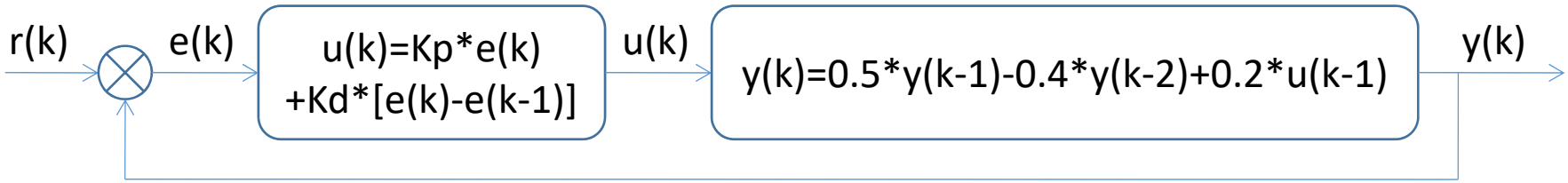
过渡时间变长

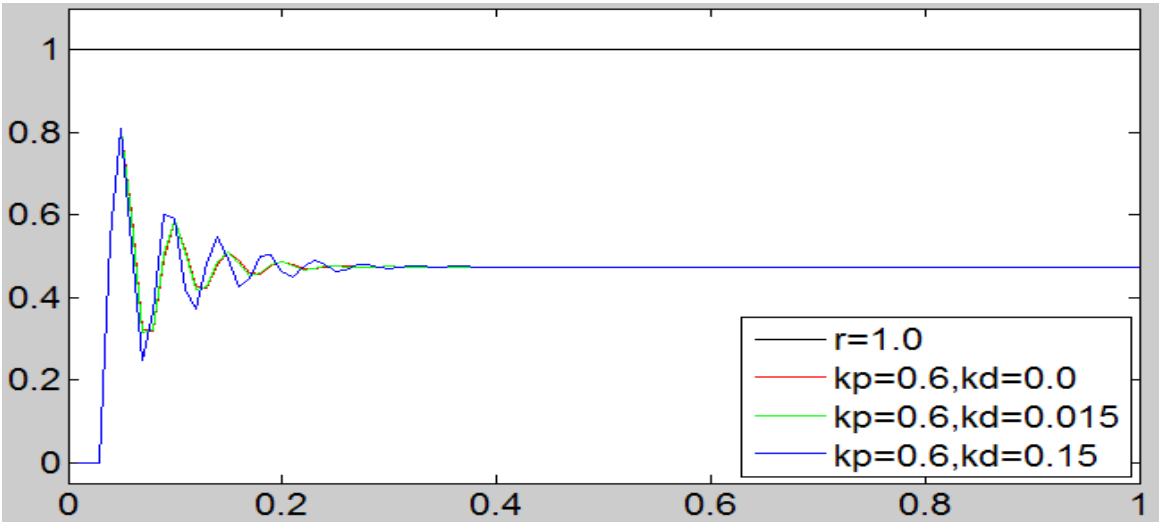
控制律中微分增益作用

$$u(t) = K_p e + K_i \int e(t)dt + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

$$\frac{de(t)}{dt} = \frac{dr(t)}{dt} - \frac{dy(t)}{dt}$$

y(t)变化越大则u(t)越小
直观上微分项抑制输出变化





Kd越大:

稳定性变好

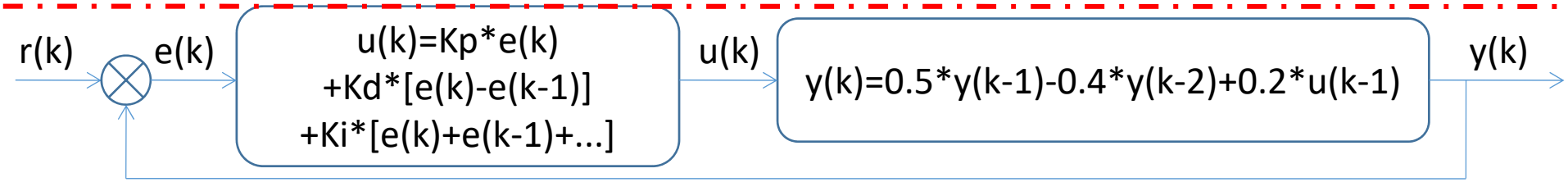
收敛速度加快

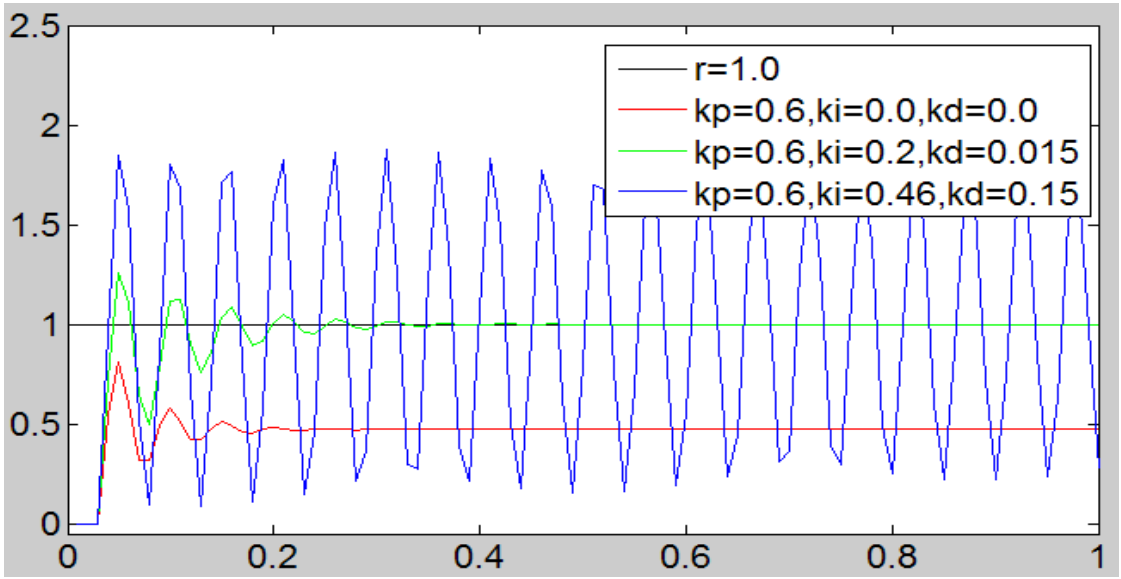
过渡时间变短

PID控制律中积分增益作用

$$u(t) = K_p e + K_i \int e(t)dt + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

e(t)积分越大则*u*(t)越大
直观上积分项驱动系统减小误差





Ki越大:

稳态误差越小

响应速度加快

稳定性变差

PID控制律三种增益手工调节方法

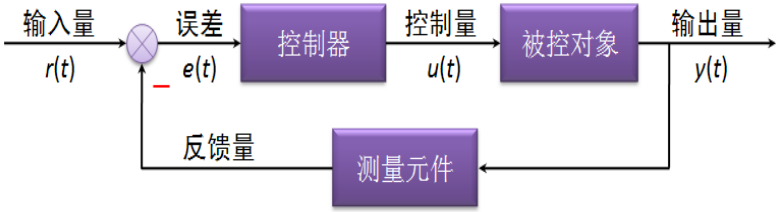
- 1）所有增益清零，使用阶跃输入信号作为调节测试信号
- 2）先调节比例增益：Kp从0开始，逐步增大至系统有少许超调及几个过渡震荡
- 3）再调节微分增益：增加Kd，使得减小超调以致没有震荡
- 4）由3）回到2）再到3），直至输出性能基本满足要求，且电机无明显低沉嘟嘟声（内部有少许电流震荡，震荡越多系统功耗越大）
- 5）少许增加积分增益：增加Ki使得稳态误差接近零，且系统过渡震荡过程时间短至合适水平

PID控制律C语言实现示例

(1) 计算原始误差： fRErr_c = fRef - fOut;

(2) 计算误差微分： fDErr_c = fRErr_c - fRErr_p;

(3) 为下一次计算做准备：fRErr_p = fRErr_c;



(4) 计算 (其中实现了防止积分饱和)

```
if( (fRErr_c>-fIntErrLmt) && (fRErr_c<+fIntErrLmt) ) fIntVol += fRErr_c;
else fIntVol = 0; //大误差是切除积分项，防止积分饱和
```

(5) 计算比例项：fCtrVol = Kp * fRErr_c;

(6) 计算并累加积分项：fCtrVol += Ki * fIntVol;

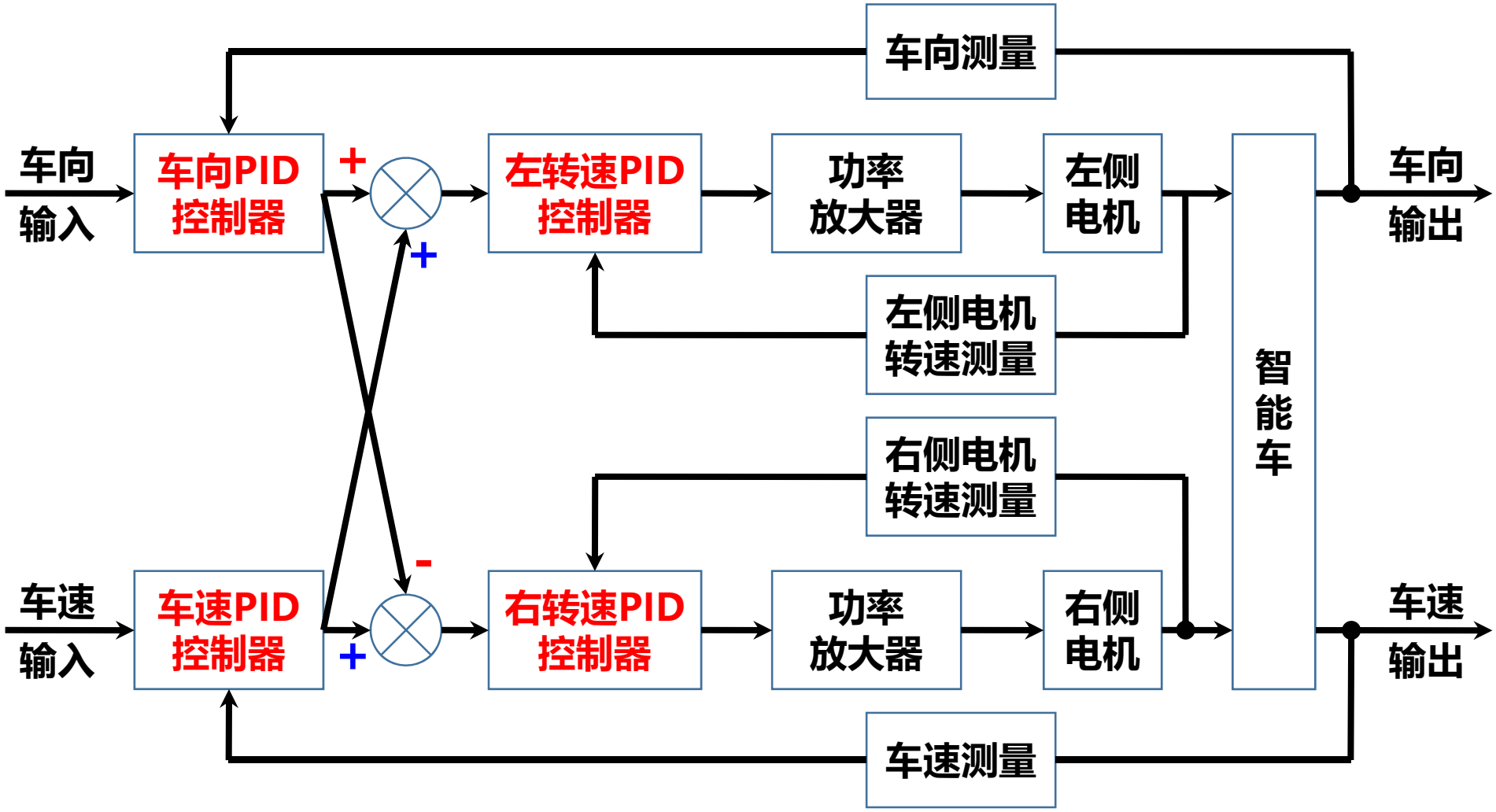
(7) 计算并累加微分项：fCtrVol += Kd * fDErr_c;

逐条编写，避免如下连续：
fCtrVol=fRErr_c*Kp+ Ki * fIntVol +Kd * fDErr_c

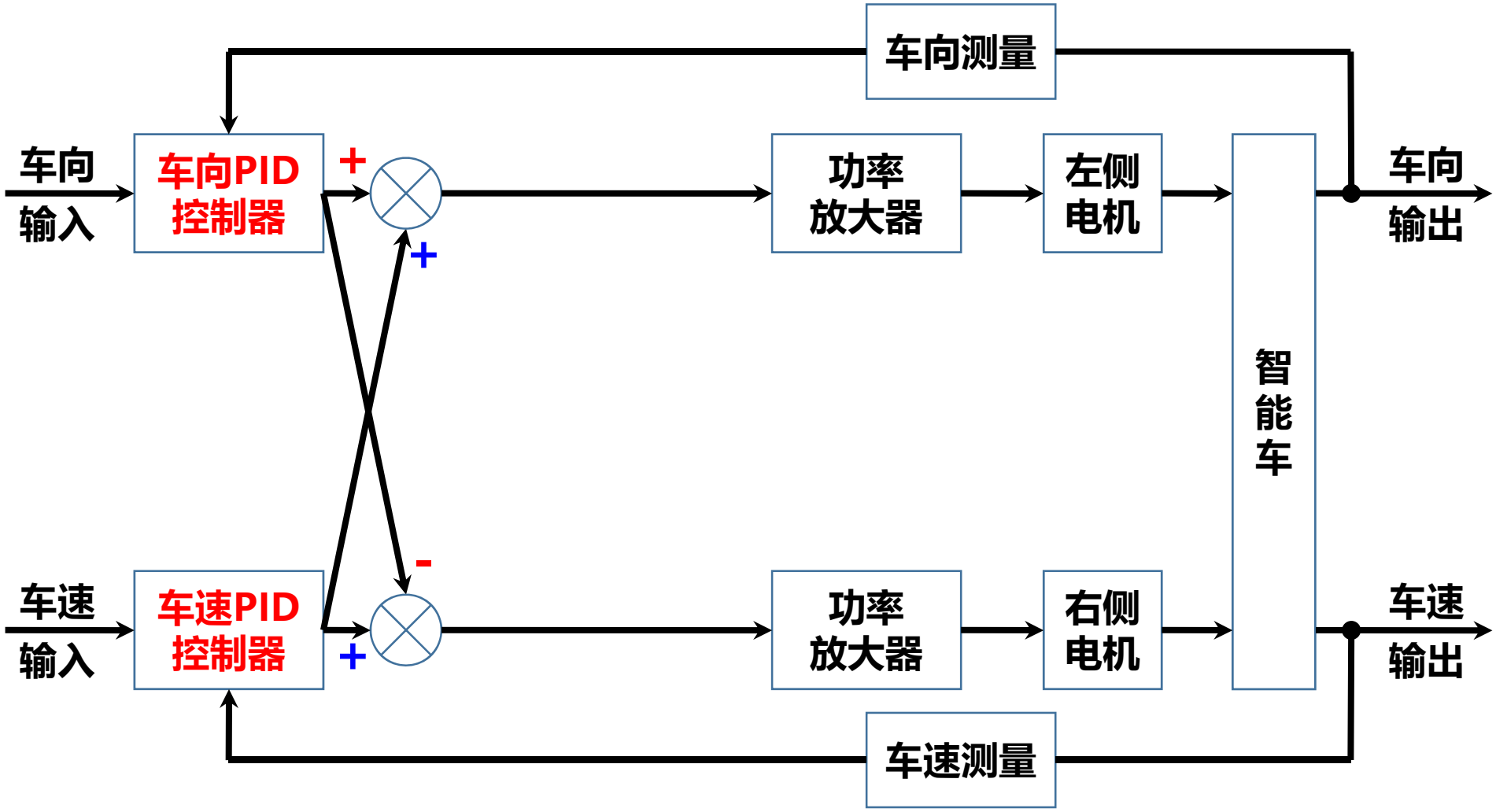
(8) 限幅后的fCtrVol就是控制器的输出结果：

```
if(fCtrVol>V_fMaxVal)    fCtrVol = V_fMaxVal;
if(fCtrVol<V_fMinVal)    fCtrVol = V_fMinVal;
```

PID应用：车向(速)闭环控制(双环)



PID应用：车向(速)闭环控制(单环)



The End