

# 基于 TMS320LF2407A 的 48 路舵机控制器研究

张 泽, 刘连蕊, 高建华  
(浙江理工大学机械与自动控制学院, 杭州 310018)

**摘 要:** 研究了一种新型数字舵机控制系统的设计问题。针对多关节机器人结构特征和运动控制特点,设计了一套基于 TMS320LF2407A 的 DSP 控制系统;分析了数字舵机控制系统的控制过程、结构组成、硬件软件实现方案。该系统具有外设简单、控制简单、运算能力强的特点。TMS320LF2407A 支持多项式的高速、高效和全变速的先进控制技术,为关节机器人实现复杂运动提供了硬件的支持。系统采用分时译码方式实现六路控制信号控制最多 48 路舵机,满足作为多关节机器人的舵机控制系统的需要。

**关键词:** 数字舵机; TMS320LF2407A; 控制系统; 多关节机器人  
**中图分类号:** TP271      **文献标识码:** A

机器人的驱动控制是机器人研究的核心。在机器人刚出现的初期,其控制系统主要采用大型电机和液压系统。随着机器人技术的发展,特别是小型多关节机器人的出现,其驱动系统有了很大的改善。其中具有很现实意义的是数字舵机的出现,使得小型多关节机器人的控制难度大大降低。本文针对多关节机器人的特点,提出了基于 TMS320LF2407A 的 48 路数字舵机控制器的设计思想。

## 1 控制器设计方案

多关节机器人主要应用于复杂地形,行走过程中需要注重步态控制、关节姿态调整等,因此舵机控制器必须具有实时、高速、运算能力强、高度协调性等特点。TMS320LF2407A 属于 Ti 公司 C2000 系列的一款经典 DSP 的产品,其专为数字电机控制和其他控制系统而设计。它内部不但有高性能的 C2xxCPU 内核,配置有高速数字信号处理的结构,且有单片电机控制的外设,采用诸如自适应控制、卡尔曼滤波和控制等先进的控制算法,支持多项式的高速、高效和全变速的先进控制技术<sup>[1]</sup>,因此采用 DSP 控制完全可以符合机器人的控制特点。数字舵机采用脉冲宽度调制(pulse width modulation, PWM)控制方式,每个数字舵机控制信号均保持独立。关节机器人具有关节多的特点,控制关节机器人往往需要多达几十路 PWM 信号线对其进行控制,仅靠 DSP 芯片一般无法产生这么多路信号,因此,必须对 PWM 信号进行扩展操作。在传统设计中,信号扩展采用串转并、总线挂载、数据译码等方式,本设计采用数据译码方式,即采用译码器对 PWM 信号作用的通道进行选择,使用单路 PWM 信号分时控制译码器各个输出端口的信号。PWM 信号扩展过程如图 1 所示。

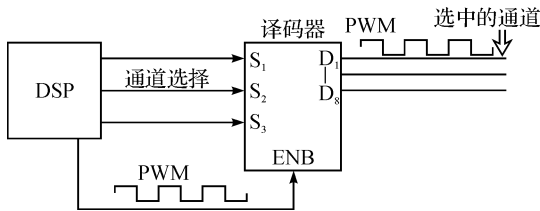


图 1 DSP 控制译码器扩展 PWM 信号图

2 控制电路的设计

2.1 TMS320LF2407A 产生 PWM 信号方式及其舵机控制方式

采用 TMS320LF2407A 全比较单元方式产生 PWM。TMS320LF2407A 内部拥有两个事件管理器(EVA, EVB)。每个事件管理器包括两个 16 位的通用定时器和 3 个全比较单元。PWM 的产生分为两个过程。

过程一:定时器周期值和比较单元跳变值的设定。当采用内部时钟电路时,设置定时器寄存器 TPSi 位可以设置定时器时钟频率,设定定时器周期寄存器的值可以设定定时器的周期值。比较单元的数值通过比较单元寄存器 CMPERi 设定,其值必须小于定时器的周期值。

过程二:PWM 的输出。PWM 的输出由 16 位比较动作控制寄存器 ACTRx 决定。ACTRx 决定了 EVx(x 取 A 或 B)事件管理器控制的 PWMi(i 取 1 至 12)引脚输出的电平特性。例如控制 PWM1 的 CMP1ACT 的 1,0 位,其组合值决定 PWM1 的电平特性。

- 00:则 PWM1 输出强制为低;
- 01:比较单元触发后将从高电平转向低电平;
- 10:比较单元触发后将从低电平转向高电平;
- 11:强制输出高电平<sup>[2]</sup>。

数字舵机控制的方式分成两种:位置控制和速度控制。本文采用位置控制的方式,其控制周期分为开始响应、角度值传递、结束响应 3 个阶段,前两个阶段可以表示为: $T_1=(0.5+\alpha\times0.008)$  ms,其中  $T_1$  表示定时器舵机达到  $\alpha$  角 PWM 高电平所需维持的时间, $\alpha$  角的取值范围为  $0\sim250^\circ$ 。根据这个公式,可以得到  $T_1$  的取值范围:0.5~2.5 ms。另外须维持低电平 0.5 ms 作为响应结束的信号。

上述 3 个阶段所需要的时间至少为 3 ms。在实际舵机控制过程中,采用角度逐步靠近目标角度的方式,每次增加  $0.72^\circ$  或者  $1.44^\circ$ 。而根据经验,单路舵机 PWM 变化间隔时间不超过 30 ms,整个舵机控制的协议如图 2 所示。其中  $T$  表示整个 PWM 输出的周期, $T_1$  为高电平的时间长度, $T_2$  为低电平的长度<sup>[3]</sup>。

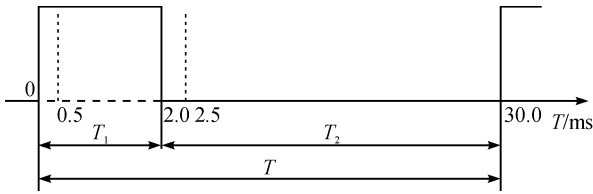


图 2 舵机信号周期分配图

2.2 PWM 信号的扩展

译码器可以将译码值为  $n$  的地址信号,转换为对应  $n$  号引脚的选通。译码器选通线的输入状态直接决定选通的引脚的输出状态。因此如果采用 DSP 的 PWM 输出引脚控制译码器的使能口,那么 PWM 信号的状态就可以保持与选中引脚状态一致,且可以利用通用 IO 口控制译码器译码口,从而很实现 PWM 控制对象的切换。本文采用的译码器是 74HC237,芯片的各个引脚关系如表 1 所示。芯片与外部信号具体连接如图 3 所示。

表 1 74HC237 引脚功能关系表

$\overline{\text{GL}}$	G1	$\overline{\text{G2}}$	A,B,C	Y0~Y7
×	×	×	×	×
L	×	×	激活	×
L	H	L	激活	常态 L,选通 H

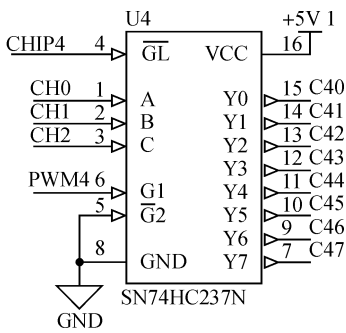


图 3 译码器连接图

TMS320LF2404A 可以产生 6 路独立 PWM,一路独立 PWM 通过译码器芯片可以转换为 8 路 PWM,因此系统最高可以实现 48 路 PWM 输出。图 3 中可以看到一块译码器至少需要 5 条输入引线,整个系统共需要 30 条引脚线。这对 DSP 的引脚资源造成了浪费。本文采用复用译码线方式(6 个译码器的译码口采用同一组控制线进行译码)使引线的数量减少到 15 根:译码线 3 根、地址锁存线 6 根、PWM 信号线 6 根。为保证 6 组译码器译码的独立性,提出了“地址锁存分选法”:假设现在除了译码器 1 外,其他译码口的 GL 口都为高电平(即当前只有译码器 1 为当前操作的对象,能且只能对译码器 1 实现译码,当译码器完成译码工作后,改变 GL 状态为高电平,译码器 1 的译码值就不会受 DSP 译码引脚的影响直到 GL 口重新激活。整个控制过程如图 4 所示。当 GL 为低电平时,A、B、C 口的值影响译码器输出口的选通,当 GL 为高电平时,A、B、C 口的值不影响译码器输出口的选通。

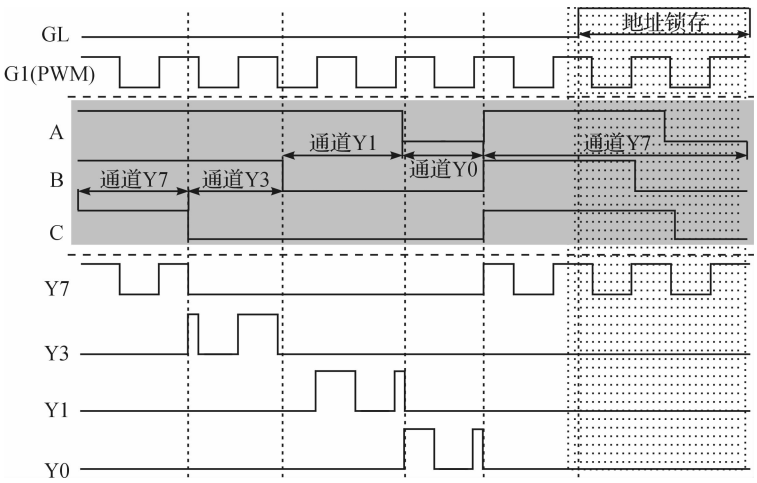


图 4 译码器引脚关系图

根据 TMS320LF2407A 的结构特点,引用 IOPB4~IOPB6 口作为译码器的 3 个译码口,IOPF0~IOPF5 作为译码器的锁存口,利用  $PWM_{2x+1}$  ( $x$  取 0 至 5)口作为译码器的使能信号口。TMS320LF2407A 控制过程引脚的分配及其控制过程如图 5 所示。

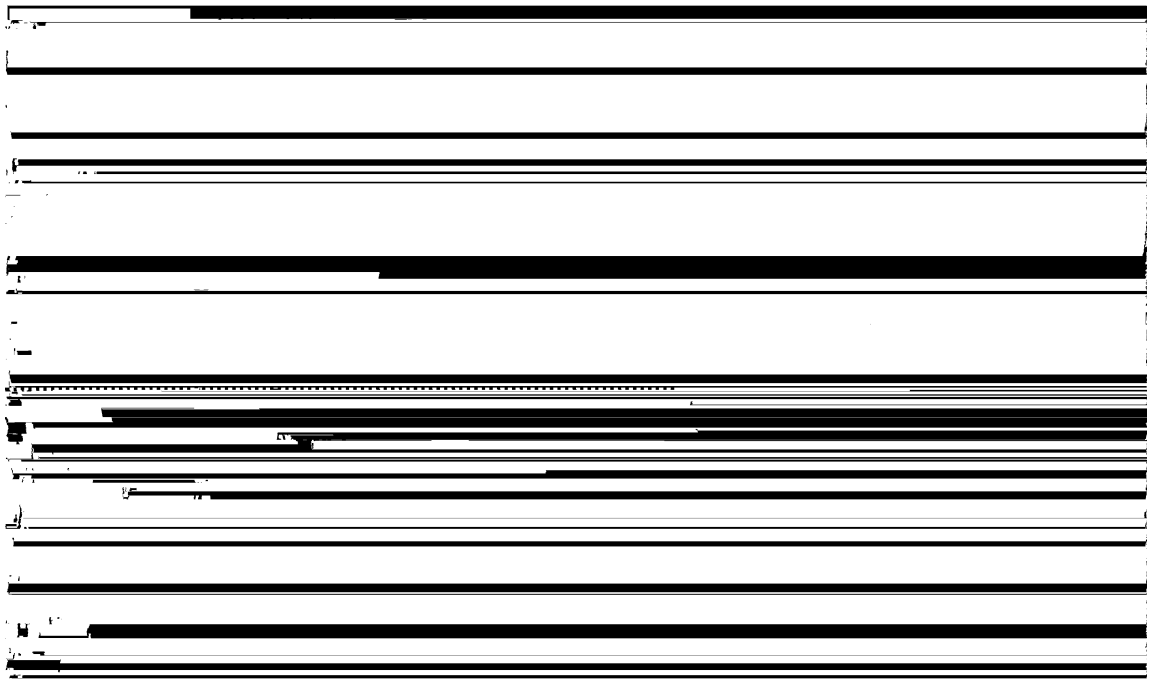


图 5 TMS320LF2407A 引脚分配及其控制过程

3 控制过程的软件实现方案

每一路 PWM 输出所需的时间根据舵机的控制协议需要 2.5 ms,于是设置定时器的周期就为 2.5 ms,设置 8 个独立的结构体变量数组记录电机的信息。这个结构体变量可以表示为如下形式:

```
struct Motor
{
    int CurAngle;//当前的角度 0~250
    int TargetAngle;//目标角度 0~250
    BYTE RunCount;//电机时钟
};
BYTE MaxCount;//系统时钟
```

```
struct Motor MyMotor[8]; //定义 8 组舵机存储结构体变量
```

```
int PreMotor //记录上一个运行电机操作对象,初始状态下指向第 0 号电机
```

DSP 运行方式主要采用中断执行的方式,通过时钟中断的形式对当前的值进行操作,因此在初始化阶段除了必须设置复用 IO 口选择寄存器以外,还必须设置定时器周期寄存器 TxCNT(x 取 1 或 3)设置周期值,在计数周期到达时将立刻响应定时器溢出中断事件,从而转入中断程序。其初始化过程如下:

```
main()
{
    asm(" SETC  INTM ");      /* 关闭总中断 */
    asm(" CLRC  SXM  ");      /* 禁止符号位扩展 */
    asm(" CLRC  CNF  ");      /* B0 块映射为 on-chip DARAM */
    asm(" CLRC  OVM  ");      /* 累加器结果正常溢出 */
    SCSR1=0xCEFE;            /* 系统时钟 CLKOUT=10 * 4=40M,开 ADC,EVA,EVB,CAN
和 SCI 的时钟,系统时钟 CLKOUT=40M */
    WDCR=0x006F;            /* 禁止看门狗,看门狗时钟 64 分频 */
    WDKEY=0x5555;
    WDKEY=0xAAAA;           /* 初始化看门狗 */
    IFR=0xFFFF;            /* 清除中断标志 */
    IMR=0x0000;            /* 打开中断 2 */
    MCRA=0x0FC7;           /* 设置 IOPA6~IOPA7,IOPB0~IOPB3 为 PWM 输出口,IOPB4~
IOPB6 为一般 I/O 口 */
    MCRC=0x00FF;           /* 设置 IOPF 口为一般 IO 口,设置 IOPE1~IOPE6 为 PWM 输出口。 */
    EVAIMRA=0x0080;        /* 定时器 1 周期中断使能 */
    EVAIFRA=0xFFFF;        /* 清除中断标志 */
    GPTCONA=0x0000;
    T1PR=6250;             /* 定时器 1 初值,定时 0.4us * 6250=2.5ms */
    T1CNT=0;
    T1CON= 0x144E;         /* 增模式,TPS 系数 40M/16=2.5M,T1 使能 */
    EVBIMRA=0x0080;        /* 定时器 3 周期中断使能 */
    EVBIFRA=0xFFFF;        /* 清除中断标志 */
    GPTCONB=0x0000;
    T3PR=6250;             /* 定时器 3 初值,定时 0.4us * 6250=2.5ms */
    T3CNT=0;
    T3CON= 0x144E;         /* 增模式,TPS 系数 40M/16=2.5M,T3 使能 */
    MaxCount=1;
    asm(" CLRC INTM ");
    while(1);
}
```

在定时器 1 发生溢出后,即会响应定时器中断。在中断程序中,可以读取舵机口的角度值,然后可以设置比较单元的值从而改变下一个周期的 PWM 的控制信号,实现舵机角度调节。本文就定时器 1 控制下 PWM1 输出口控制的舵机口为例,介绍如何实现单路 PWM 信号实现控制多路舵机口。其控制过程如图 6 所示,可分为 3 步。

a)读取先前运行的电机号;

b)从先前运行电机的下一号电机(记为  $N$ )开始进行循环扫描,比如先前的电机号为 5,那么开始从第 6 号电机开始扫描,如果先前的电机号为 7,那么开始从第 0 号电机开始扫描<sup>[3]</sup>;

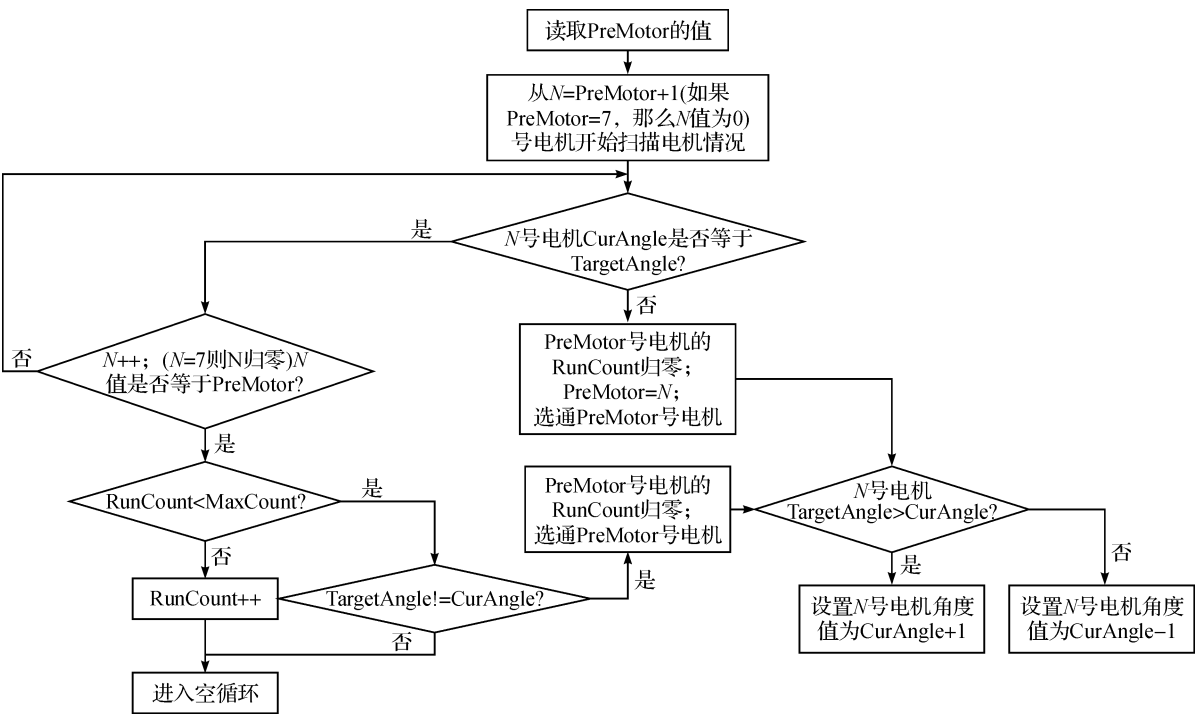


图 6 舵机软件控制方案

c)读取第  $N$  号电机的当前角度值和目标角度值,就可以得到两种不同的结果:

①不相等。跳出扫描循环,将  $\text{PreMotor}$  值设置为  $N$  号(以便下次扫描时可以用到)并片选到  $N$  号电机,然后根据  $\text{CurAngle}$  和  $\text{TragetAngle}$  的值设置比较单元的值,以便在这次 PWM 输出过程中输出相应的 PWM 波形。

②相等。不对  $N$  号电机进行任何操作,直接跳到下一个电机再进行判断。如果当扫描完除了  $\text{PreMotor}$  电机外的其他电机,发现都不需要进行角度值的改变。则控制器将继续对  $\text{PreMotor}$  电机进行操作,当然, $\text{PreMotor}$  的值也不需要改变。但是需要注意到的一点是电机运行是需要时间的,即使是只移动  $0.72^{\circ}$  也至少需要  $0.5\text{ ms}$  的时间进行调整,因此这里不能在电机上次运行完毕后直接运行,而是应该有个至少  $0.5\text{ ms}$  的空隙进行电机运转调整。这里设置了  $\text{RunCount}$  进行必要的间隔设置。其作用在于记录单个电机连续运转过程中的时间间隙  $\text{RunCount} \times 2.5\text{ ms}$ ,这里设置  $\text{RunCount}$  的最大值  $\text{MaxCount} = 1$ ;即每运行  $1^{\circ}$ ,在其他电机没动作的情况下,自动停止  $2.5\text{ ms}$  时间后再次运行<sup>[4-5]</sup>。这样就可以保证电机能够顺利稳定的运行了。

```
void c_int2()                /* 中断服务程序 */
{
    BYTE N;
    int Dif;
    BYTE m;
    if(PIVR! =0x27)
    {
        asm(" CLRC INTM ");
        return;
    }

    if(PreMotor>=7)           /* 判断上一个电机号 */
        N=0;
    else
        N=PreMotor++;
```

```

while(N! =PreMotor)    /* 循环扫描当前组电机 */
{
    if(MyMotor[N].CurAngle! = MyMotor[N].TargetAngle)/* 判断 N 号电机目标角和实际角是否相等 */
    {
        MyMotor[N].RunCount=0; /* 不一致将当前值向靠近目标值的方向靠拢 */
        PreMotor=N; /* 设置上个舵机号为当前值,为下一个循环做准备 */
        m=N*16;
        CMPR1= MyMotor[N].CurAngle*20; /* 设置比较单元的值。 */
        PBDATDDIR=0x7000;
        PBDATDDIR= PBDATDDIR & m;
        Dif= MyMotor[N].CurAngle-MyMotor[N].TargetAngle);
        MyMotor[N].CurAngle+= Dif/abs(Dif);
        PFDATDIR= PFDATDIR | 0x0101; /* 使能译码器译码口,选择输出口 */
        break; /* 退出循环体 */
    }
else
{
    if(N<7)
        N++;
    else
        N=0;
}
if(N== PreMotor)/* 循环扫描其他电机目标角度与当前角度均为一致,控制先前关节运动 */
{
    if(MaxCount> MyMotor[N].RunCount)/* 判断上一次电机运动是否已经进行过空循环 */
    {
        MyMotor[N].RunCount++; /* 没有进行过,进行标志,以便下次可以正常运行 */
    }
    else
    {
        if(MyMotor[N].CurAngle! = MyMotor[N].TargetAngle)
        {
            MyMotor[N].RunCount=0; /* 改变 N 号电机的角度值,使之靠拢目标值 */
            Dif= MyMotor[N].CurAngle-MyMotor[N].TargetAngle);
            MyMotor[N].CurAngle+= Dif/abs(Dif);
            CMPR1= MyMotor[N].CurAngle*20; /* 设置比较单元的值 */
        }
    }
}
}
EVAIFRA=0x80; /* 定时器 1 使能 */
asm(" CLRC  INTM "); /* 开中断 */
}

```

4 结 语

提出了基于 TMS320LF2407A 芯片利用译码器实现将 6 路 PWM 信号扩大为 48 路 PWM 信号的一种方案,为多关节机器人动力元件——数字舵机的多通道控制提供了有效的解决方案。

本系统特点:

- a)具有高速信号处理能力;
- b)最多实现 48 路舵机的控制能力;
- c)控制方式简单,控制能力强。

参考文献:

[1] 张毅刚. TMS320LF240X 系列 DSP 原理、开发与应用[M]. 2 版. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2007: 12-13.  
[2] 郑 红. DSP 应用系统设计实例[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2008: 282-283.  
[3] 李北斗. 数字舵机驱动控制的研究和设计[J]. 计算机时代, 2008(1): 22-23.  
[4] 江安明. DSP 应用开发实用子程序[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2005: 334-348.  
[5] Barnett R, Cull L. Embedded C Programming and the Atmel AVR[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003: 200-210.

Design of 48-Channel Digital Servo Controller Based on TMS320LF2407A

ZHANG Ze, LIU Lian-rui, GAO Jian- hua

(School of Machinery and Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** A new design problem in digital servo control system for structural characteristics of multi-joint robot and motion control features is studied. The research designs a set of DSP-based control system TMS320LF2407A. It analyzes the digital servo control system to control the process, structure, hardware and software implementations. The system achieves simple control and computing power. Polynomial TMS320LF2407A support high-speed, high efficiency and full speed of advanced control technologies for joint complex movements of the robot hardware. While time-sharing system is the realization of decoding the control signal to control up to six 48-foot Servos, it meet needs of a multi-joint robot servo control system.

**Key words:** digital servo; TMS320LF2407A; control systems; multi-joint robot

(责任编辑: 杨元兆)