

摘要：首先设计了两足步行机器人的本体结构，并选择舵机作为驱动源。然后，基于广义坐标对该机器人进行了运动学建模，该方法运算简便、直观易懂。重点讨论了动态步行的算法设计，详细分析了基于零力矩点的仿人机器人动态步行运动规划方法。结合机器人的几何约束和运动约束，推导机器人参数化步态设计的推导公式，机器人步态的参数化设计大大方便了机器人的运动学和动力学分析。最后，介绍了运动规划的实验设计，并对关节调试作了总结和分析，指出了存在的问题和解决的办法。

关键词：两足步行机器人；平衡稳定性；步态规划；静态步行；动态步行

中图分类号：TP242.3 文献标识码：A 文章编号：1006-883X(2016)11-0007-06

收稿日期：2016-10-12

舵机控制步行机器人系统设计

何乙琦 虞益龙

常州刘国钧高等职业技术学校，江苏常州 213025

一、项目背景

机器人是近年来迅速发展起来的高新技术密集的机电一体化作品，机器人的控制是综合体现了高级机器人的机构学、运动与动力学、现代设计理论、信息检测和感知、微电子学、控制理论等诸多方面的研究和水平，是一个复杂的综合系统^[1]。

随着机器人技术的飞速发展，科学家们开始致力于双足步行机器人的研究并取得了很大的成果^[2]。2000年11月29日，我国首台双足步行机器人在国防科技大学研制成功，实现了平地前进、后退、左右转弯、上下台阶等人类所具备的基本功能，并具备一定的语言功能^[3]。

机器人不仅为众多领域提供了科学研究的课题，而且本身也蕴涵了无限的商机。中国要成为科技强国，就必须能够开发和生产出大量的具有高科技含量和高附加值的产品。目前市场上推出的机器人，要么功能过于简单，只是外形仿人类，采用轮式行走或不能行走；要么过于高档和复杂，性能先进，价格高昂，普通消费者难以承受。如果能够开发出一种相对简单、成本较低、具有二次开发的平台并且能够完成简单行走动

作的双足机器人，将会填补市场的一个空白，这便是本文所研究的目标所在。

二、机器人的设计

1、机器人的功能

要设计和开发一个机器人，首先应该对其进行整体的分析和设计：

(1) 机器人外形与人相似，有双手、双腿、躯干和头等几部分（本文主要是针对机器人的腿部关节进行开发）；

(2) 机器人能够在平整的地面上以步行方式向前行走，并在此基础上实现转弯功能^[4]；

(3) 可以接受开关指令，按照不同的指令执行不同的动作。后续升级中，在实现上面的基本功能之后，还可以给机器人升级加上以下扩展功能：

①给机器人加上语音模块，使其能够接受语音指令的指挥，并根据不同的动作和情况发出不同的声音；

②给机器人加上触感、温度、避障和声光等各类传感器，使机器人具备一定的环境适应能力和人机交互能力，更富有娱乐性。

2、设计原则

双足步行机器人不同于普通的产品，它可以定位于玩具上，要求成本低廉，普通消费者能够购买得起，功能相对来说也比较单一，因此不能采用高档的材料和元器件。

基于以上的考虑，有下面几条设计原则：

(1) 经济性：在满足功能的前提下尽可能采用简单的方案，使用常见的、供应丰富的材料和元器件，以降低制作成本；

(2) 可靠性：机器人的使用环境比较恶劣，有电机启制动火花对无线通讯及控制系统的干扰，有可能遇到的碰撞以及关节被卡住造成电机堵转等各种情况，对机器人控制系统提出了一定的要求；

(3) 强壮性：机器人的腿都是由各个关节链接起来的，对刚性的要求比较高。在机械设计上，机器人应具有较好的刚性和较小的传动间隙，不至于发生严重的机械变形，各种接插件不能松动、脱落；

(4) 可维护性：包括机械维护和控制系统软硬件维护。机械上尽可能采用模块化设计方法，减少零部件种类，提高通用性，便于安装拆卸，同时也可以提高可靠性和经济性。控制系统软硬件设计同样采用模块化设计，便于检测调试。

3、总体结构和系统配置

(1) 关节

把人体作为实际的参考模型，本着尽可能简化的原则，尽量使机器人关节的位置、旋转的角度和重心的位置与人的实际情况相符^[5]。

踝关节：在单腿支撑阶段，支撑腿的整个脚压在地面上，通过踝关节支撑整个身体。在运动的过程中，上身应该保持垂直向上，只作自由的平移运动，既不向前或后俯仰，也不在左右方向倾斜。支撑腿随着上身的移动而绕着脚摆动。这样踝关节就必须有两个互相垂直的自由度，一个可以绕 X 轴旋转，允许腿左右摆动，用来调整身体在前视平面中的位置，一个可以绕 Y 轴旋转，允许腿前后摆动，用来调整身体在侧视平面中的位置。

髋关节：每条腿上至少需要设置 3 个自由度，才能使重心自由地移动，但是机器人的行走动作会受到

很多的限制，而且对关节驱动力矩的要求也比较高，某些步态实现起来可能很困难。增加额外的自由度将能够改善机器人的运动性能，降低所需的驱动力矩，使其拥有更大的灵活性。机器人的行走灵活性依赖于腿部所拥有的自由度。通过添加膝关节，增加一个自由度，可以使脚垂直地往上提至一定的高度，以越过障碍物，同时使行走动作更加灵活，也减小了各个关节的驱动力矩，可以完成更加灵活的步态。

膝盖基本上是一个铰链式的关节，只有一个自由度，可以绕 Y 轴旋转。髋关节、膝关节和踝关节各有一个自由度，这三个自由度互相配合，可以完成复杂的动作。每条腿具有上述的 4 个自由度，机器人能够比较灵活地前进和后退了，但是不能改变行走方向，只能直线行走。要想让机器人能够转弯，还必须给每条腿增加一个髋关节的侧向自由度。

(2) 驱动系统

① 电机的选择

电动机是机器人驱动系统中的执行元件，常采用步进电动机、直流伺服电动机等。步进电动机转速和位置控制比较容易实现，可不用反馈回路，但受尺寸限制，超小型的步进电机很难购到，而且步进电动机的驱动器比较复杂，体积也往往较大。相反，小的直流伺服电动机容易得到，且通过减速系统可获得较大的转矩，要控制位置和速度，需要反馈回路，对控制系统的要求比较高。经过综合比较，决定采用台湾的 FUTABA，型号为 S3003 的小型直流伺服电动机（本文中简称舵机）。关节的驱动扭矩定为满足机器人在平地以一定的速度行走的需要，具体计算过程不再讨论。

② 减速器的选择

由于电机转速较高，关节所需的驱动力矩较大，故要求减速器的变比很大。经过计算，腿部中的 8 个关节减速器的变比为 100。要实现比较大的减速比，比较常用的减速器有行星齿轮减速器、谐波减速器和涡轮蜗杆减速器等。行星齿轮减速器和谐波减速器可以得到比较大的减速比，但是价格较高。经综合考虑，决定采用一级涡轮蜗杆加三级常规齿轮减速方案。

(3) 传感器

机器人的关节对位置精确度要求不高，为了简化控制电路以及降低成本，决定采用电位器作为关节的反馈元件。电位器是最常见的一种电阻式位移传感器，具有很多优点。它的输入输出特性可以是线性的，由输出信号可以很简单地得到被测量。输出信号选择范围大，只需改变基准电压，就可以得到比较大或比较小的输出电压信号。这种位移传感器不会因为失电而失去检测的信息，还有性能稳定、结构简单等优点。目前电位器的精度已经达到应用于一般关节控制的水平。机器人总共使用 8 个电位器都用在腿部的关节中。

(4) 电源

在选择电源时应考虑以下几个方面：

①能量密度：安装在双足步行机器人里面的舵机有八台之多，加上控制系统，需要的功率比较大。而机器人必须将电源随身携带，也就是要将电源放置在机器人体内。故对电源的能量密度（单位质量的最大能量）要求比较高，以便在满足一定时间的使用要求下尽可能减少电源的体积和重量。

②电压等级：通常舵机与控制电路对电压的要求不同。对于控制系统的电子线路采用 3~5V 电压供电，电流一般不大，通常在几十毫安到几百毫安之间。舵机的供电电压则为 4~6V，需要的电流也相当大，尤其是在几台舵机同时起动的時候。

③电压稳定性：控制电路对供电质量要求很高，需要用稳定的电源供电。而舵机转动时会产生一定的高频噪声干扰，故舵机和电子线路的供电电源应很好地隔离，同时对电子线路采取抗干扰措施。综合比较上述因素，决定采用 1.2V 镍氢可充电电池，由多节电池串连组成电池组。考虑到电压等级不同和舵机干扰等因素，选用两套电源分别对驱动电路和控制系統板供电。

三、步态分析与计算

1、步态规划的约束条件

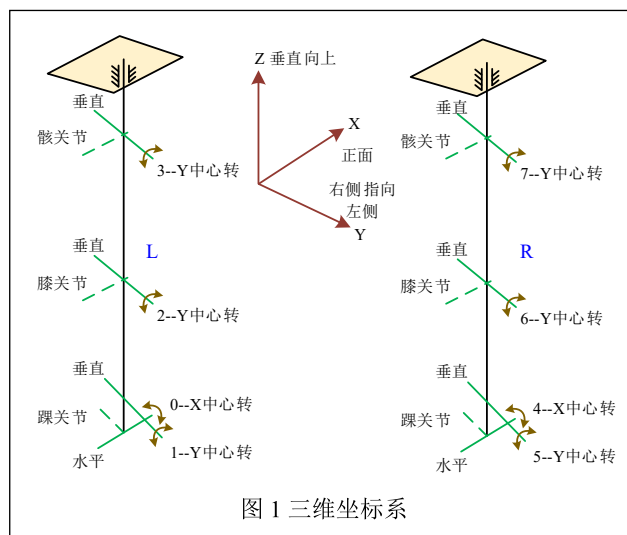
步态规划的实质是根据约束条件，通过解方程得到运动变量。约束条件可分为几何约束及运动约束，几何约束视机器人的结构而定，在此不作详细讨论。

运动约束一般根据研究人员的目的而定，是下面讨论的重点，本课题选取的运动约束包括：足端轨迹、髌关节轨迹等。

2、足端轨迹的运动分析方法

对于迈步腿足端轨迹，主要选取的轨迹是几段简谐运动的合成。其主要依据是解决足端在单足支撑期的始末位置可能发生的与地面之间的碰撞及由于运动速度发生突变而引起的机器人自身的冲击问题^[6]。

为了达到上述目的，首先从足端的加速度分析着手。首先建立如图 1 的坐标系，其中坐标系的原点位于支撑腿踝关节上，X 轴指向步行前进的方向，Y 轴指向垂直方向。迈步腿足端的坐标用 (x_a, y_a) 表示。



(1) 足端在 X 方向的运动规律

为了使足端在迈步腿刚脱离地面和与地面刚接触的瞬时不与地面发生碰撞，则足端速度在这两个时刻应为零；而为了使迈步腿的足端在上述两个时刻的自身不发生急动，则足端加速度在这两个时刻也应为零^[7]。

设计的足端轨迹如下：

设足端加速度为：

$$\ddot{x}_a = A_m \sin\left(\frac{2\pi}{T_l} t\right) \quad (1)$$

其中， A_m —待定系数（根据足端的重量与尺寸大小确定的常数）；

T_l 一足转移支撑点所用的时间, 即指单足支撑期时间。

显然, $\ddot{x}_a|_{t=0} = \ddot{x}_a|_{t=T_l} = 0$, 满足足端无急动的条件。

由 (1) 式进行积分可得:

$$\dot{x}_a = -\frac{A_m T_l}{2\pi} \cos\left(\frac{2\pi}{T_l} t\right) + C_1 \quad (2)$$

其中, C_1 为常量要满足始末时刻与地面无冲击的条件, 则应有: $\dot{x}_a|_{t=0} = 0$, 联立此式与 (2) 式即可解得:

$$C_1 = \frac{A_m T_l}{2\pi}, \text{ 则有:}$$

$$\dot{x}_a = -\frac{A_m T_l}{2\pi} \cos\left(\frac{2\pi}{T_l} t\right) + \frac{A_m T_l}{2\pi} \quad (3)$$

由 (3) 式可知, $\dot{x}_a|_{t=0} = \dot{x}_a|_{t=T_l} = 0$, 所以该速度表达式满足足端无冲击的条件。设 C_2 为 (3) 式的积分常量, 再由 (3) 式积分可得:

$$x_a = -\frac{A_m T_l}{2\pi} \left[t - \frac{T_l}{2\pi} \sin\left(\frac{2\pi}{T_l} t\right) \right] + C_2 \quad (4)$$

代入足端位置的初始条件: $x_a|_{t=0} = C_a (C_a < 0)$,

$$x_a|_{t=T_l} = L + C_a$$

其中, C_a 一足端腿在刚脱离地面的时刻其所处的位置;

L 一步长。

则得到足端在 X 坐标方向的轨迹为:

$$x_a = -\frac{L}{T_l} \left[t - \frac{T_l}{2\pi} \sin\left(\frac{2\pi}{T_l} t\right) \right] + C_2 \quad (5)$$

(2) 足端在 Y 方向的运动规律

同理, 为了使足端在 Y 轴方向不发生急动和与地面的碰撞, 构造足端在 Y 向的轨迹如下:

因为足端在 Y 向有抬起和落下的两个过程, 所以分段构造 Y 向轨迹函数。以在平坦地面上为例分析, 设足端在时刻 $T_l/2$ 达到最高点 H_h 后开始下落, 在时刻 T_l 落在地面上。

$$\textcircled{1} \quad 0 \leq t \leq \frac{T_l}{2} \text{ 时}$$

将 (1) ~ (5) 中的 T_l 换成 $T_l/2$ 即可, 则由此可得:

$$\begin{cases} \ddot{y}_a = \frac{8\pi H_h}{T_l^2} \sin\left(\frac{4\pi}{T_l} t\right) \\ \dot{y}_a = -\frac{2H_h}{T_l} [1 - \cos\left(\frac{4\pi}{T_l} t\right)] \\ y_a = -\frac{2H_h}{T_l} \left[t - \frac{T_l}{4\pi} \sin\left(\frac{4\pi}{T_l} t\right) \right] \end{cases} \quad (6)$$

$$\textcircled{2} \quad \frac{T_l}{2} \leq t \leq T_l \text{ 时}$$

$$\text{取 } y_a = -\frac{2H_h}{T_l} \left[t - \frac{T_l}{4\pi} \sin\left(\frac{4\pi}{T_l} t\right) \right] + C_z, \text{ 由 } y_a|_{t=T_l} = 0,$$

得到 $C_z = 2H_h$, 所以, 此时间段内的轨迹如下:

$$\begin{cases} \ddot{y}_a = \frac{8\pi H_h}{T_l^2} \sin\left(\frac{4\pi}{T_l} t\right) \\ \dot{y}_a = -\frac{2H_h}{T_l} [1 - \cos\left(\frac{4\pi}{T_l} t\right)] \\ y_a = -\frac{2H_h}{T_l} \left[t - \frac{T_l}{4\pi} \sin\left(\frac{4\pi}{T_l} t\right) \right] + 2H_h \end{cases} \quad (7)$$

用两个摆线函数组合成 Y 向轨迹, 可使速度和加速度的曲线均较平滑, 同时保证了开始抬腿和足与地面开始接触时刻的加速度和速度均为零, 消除了 Y 方向的急动和撞击。

3、足端的轨迹规划

(1) 单足支撑期内

通过以上分析, 要使机器人在步行过程中足端不与地面发生碰撞和自身不会产生冲击, 其足端的轨迹规划可以分别在选取 $x_a = x(t)$, $y_a = y(t)$ 后, 再得到 $y_a = f(x_a)$ 。但也可对上述求解过程稍作变化, 即在得到 x_a 关于时间 t 的表达式之后, 不再去求 y_a 关于时间 t 的表达式, 而是直接给出 y_a 关于 x_a 的无冲击、无急动的表达式, 其分析方法与得到坐标位置关于时间 t 的无冲击、无急动表达式一样^[8]。

如图 2 所示: 令足端在单足支撑期内的初始位置为: $(C_a, -S_c, 0)$

$$\text{其中, } C_a = -\frac{L}{2} + L_{6a};$$

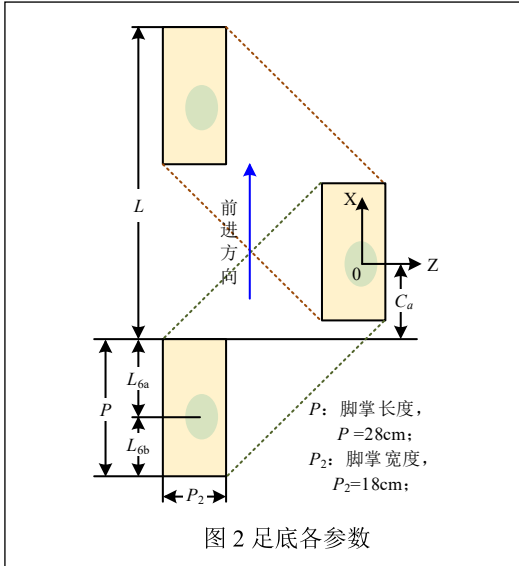
L 一步长;

L_{6a} 一前脚掌的长度 (L_{6b} 一后脚掌的长度);

S_c 一踝关节高度。

运算复杂度之间的平衡之后, 运用上述的分析方法, 则在综合考虑步行性能和最终得到的足端轨迹为:

$$\begin{cases} x_a = -\frac{L}{T_l} \left[t - \frac{T_l}{2\pi} \sin\left(\frac{2\pi}{T_l} t\right) \right] - \frac{L}{2} + L_{6a} & 0 \leq t \leq T_l \\ y_a = \frac{H_h}{2} \left[1 + \cos\left(\frac{2\pi x_a t}{L}\right) \right] - S_c \end{cases} \quad (8)$$



其中, T_1 —单足支撑时间;

h —机器人在步行过程中髌关节离地面的高度, $h=85\text{cm}$;

H_h —迈步高度, $H_h=5\text{cm}$ 。

显然, 上述足端轨迹满足前述所说的条件。

(2) 双足支撑期内

双足支撑期内开始时迈步腿脚掌已经着地, 称之为前脚掌。由于前脚掌始终处于着地的水平状态, 因此它的运动形式不能任意选取, 而是具有以下的固定形式:

$$x_a=y_a=0$$

4、纵向平面内髌关节的运动轨迹

(1) 单足支撑期内

对于纵向上支撑腿和迈步腿上髌关节的运动, 在不考虑横向运动对纵向运动影响的情况下, 两个关节的运动轨迹是重合在一起的, 即:

$$\begin{cases} x_3 = x_2 \\ y_3 = y_2 \end{cases} \quad (9)$$

则只需考虑其中一个髌关节—支撑腿髌关节的运动状态即可, 现分析如下:

为了使机器人在行走过程中不因下肢的运动而使上身发生上下起伏, 造成行走中的能量耗费和对步行稳定性的负面影响, 令其 Y 方向的坐标为常量。对于髌关节在 X 方向上运动初始条件的

确定, 则考虑到双足支撑期的运动情况。因为髌关节在单足支撑期起始时刻的速度必须等于双足支撑期终了时刻的速度, 而单足支撑期末了时刻的速度则要等于双足支撑期起始时刻的速度^[9], 所以:

$$\dot{x}_3(0)|_{0 \leq t \leq T_1} = \dot{x}_3(T_1)|_{T_1 \leq t \leq T} \quad \dot{x}_3(T_1)|_{0 \leq t \leq T_1} = \dot{x}_3(T_2)|_{T_1 \leq t \leq T}$$

其中, T —步行周期的一半, $T=T_1+T_2$;

T_1 —单足支撑期时间, $T_1=1\text{s}$;

T_2 —双足支撑期时间, $T_2=0.25 T_1$

在给定初始条件之后, 髌关节在 X 方向上的运动也有多种规划方法, 其中一种是髌关节在 X 向作匀速直线运动, 即髌关节的运动轨迹为:

$$\begin{cases} x_3 = v_3 t + C_3 \\ y_3 = h \end{cases} \quad (10)$$

式中, C_3 —X 方向上的轨迹常数;

v_3 —舵机启动时的匀速度, 由初始的环境条件确定, 可以通过转速测量仪表来确定;

h —脚掌高度。

(2) 双足支撑期内

对于髌关节的运动, 前面已经提到要综合考虑单足支撑期和双足支撑期的运动情况, 即双足支撑期起始时刻的速度必须等于单足支撑期起始时刻的速度, 而双足支撑期终了时刻的速度要等于单足支撑期末了时刻的速度, 所以:

$$\dot{x}_3(T_1)|_{T_1 \leq t \leq T} = \dot{x}_3(T_1)|_{0 \leq t \leq T_1} \quad \dot{x}_3(T)|_{T_1 \leq t \leq T} = \dot{x}_3(0)|_{0 \leq t \leq T_1}$$

同时, 为简化问题起见, 令双足支撑期内髌关节在 X 方向作匀速运, 即:

$$\begin{cases} x_3 = v_3(t - T_1) + C_3 \\ y_3 = h \end{cases} \quad (11)$$

为了使步行运动能够连续的进行下去, 髌关节在单足支撑期和双足支撑期内的移动距离应为步长的一半, 即 $L/2$, 可以得到髌关节在双足支撑期内的轨迹表达式为:

$$\begin{cases} x_3 = \left(\frac{L}{2T_2} - \frac{L_3}{T_2}\right)(t - T_1) + L_3 - |C_3| \\ y_3 = h \end{cases} \quad T_1 \leq t \leq T \quad (12)$$

四、总结

从收集有关机器人和步态规划的各类论文、书籍和网上资料等开始, 经过市场元器件调查和选择、初步方案比较和筛选, 然后对机器人的机械结构、硬件电路和控制软

件等几方面进行了详细的设计和实现，终于组装出了一个机器人原型。这个原型只具有双腿，共设有 8 个关节自由度。每个关节按照模块化原则设计其基本结构和驱动系统。本文完成的一个重要部分是对机器人的步态规划。在这个部分里，对人类的行走步态及其特点进行了详细的分析，讨论了机器人行走时的稳定性评价标准。利用前人提出的步态规划思想，对机器人前向直线行走步态进行规划，利用三次样条插值方法计算机器的脚部轨迹，再由脚轨迹根据腿部的三角几何关系得到腿部各个关节的轨迹。上述规划步骤采用计算程序加以实现，最终计算出关节轨迹数据供控制系统使用。

参考文献

- [1] 宋家慧, 孔令美. 采摘机器人视觉伺服策略研究 [J]. 农机化研究, 2016(12):81-85.
- [2] 谭民, 王硕. 机器人技术研究进展 [J]. 自动化学报, 2013(7):963-972.
- [3] 葛君山. 基于单片机和 GPS 定位的自主导航采摘机器人设计 [J]. 农机化研究, 2016(12):237-241.
- [4] 韩庆瑶, 洪草根, 朱晓光, 徐瑾. 基于 AVR 单片机的多舵机控制系统设计及仿真 [J]. 计算机测量与控制, 2011 (2):332-334
- [5] 张祖林. 双足步行机器人步态设计及其运动控制研究 [D]: [硕士学位论文]. 南昌: 南昌航空大学航空与机械工程学院, 2008.
- [6] 范强. 双足竞步机器人设计及其步态规划研究 [D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东理工大学机械工程学院, 2009.
- [7] 高飞, 王太杰, 吴攀, 林俊杰. 双足行走机器人多舵机控制及动态平衡研究 [J]. 高校实验室工作研究, 2012(1):117-119
- [8] 万小丹, 孔凡让, 李岩, 赵小伟. 基于 AT89C52 单片机的机器人关节控制系统设计 [J]. 机电一体化, 2008(2):38-40.
- [9] 程南瑞. 类人机器人控制系统的底层设计与步态规划 [D]: [硕士学位论文]. 无锡: 江南大学, 2009.

Design of a servo -controlled walking robot system

HE Yi-qi, YU Yi-long

(Changzhou Liu Guojun Vocational Technology College,
Changzhou 213025, China)

Abstract: At first, the mechanical architecture of biped robot with servo as driving unit is designed in this paper.

Then, the kinematical modeling is done to the robot based on generalized coordinates. This method is easy in calculation and comprehension. The emphasis of the paper is laid on the algorithm used for design of dynamic walking motion. The dynamic motion planning method based on ZMP (Zero Moment Point) is analyzed in detail. Then, the equation of robot's walking pattern based on parameter is derived by making use of geometry restrains and walking restrains. The walking pattern designed based on parameters predigests the kinematics and dynamics analyses obviously. In the end, the experiment design of the motion plan is introduced and the joint debugging is summarized and analyzed. The existing problems are pointed out and the solutions are given.

Keywords: biped walking robot; stability gait planning; gait planning; static walking; dynamic walking

作者简介

何乙琦, 常州刘国钧高等职业技术学校, 讲师, 电子电工

虞益龙, 常州刘国钧高等职业技术学校, 讲师, 自动控制

通信地址: 江苏省常州市天宁区和平北路 11 号保险大厦 1606 室

邮编: 213001

邮箱: 119423659@qq.com