

基于遗传算法优化的仿人足球机器人步态规划研究*

吴泽琦, 吴根忠*

(浙江工业大学 信息工程学院, 浙江 杭州 310023)

摘要: 针对机器人足球比赛的特点及实现仿人足球机器人稳定快速步行的要求, 提出了一种基于遗传算法优化的步态规划方法。首先, 分析了仿人足球机器人一个完整步行周期的运动过程, 根据步行中髋关节运动连续和踝关节运动间断的特点, 分别采用三次样条插值与高次多项式插值进行了轨迹插值; 其次, 以零力矩点 (ZMP) 稳定裕度为参数构造了目标函数; 最后, 利用遗传算法 (GA) 对规划的步态进行了优化, 从而得到了 ZMP 稳定裕度相对较大的稳定步态。仿真结果表明, 该方法规划的步态能实现仿人足球机器人更稳定地步行。

关键词: 仿人足球机器人; 步态规划; 高次多项式插值; 三次样条插值; 零力矩点; 遗传算法优化

中图分类号: TP242.3; TP273.5

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2012)11-1340-05

Research of humanoid soccer robot gait planning based on GA optimized

WU Ze-qi, WU Gen-zhong

(College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

Abstract: Aiming at the features of the RoboCup match and the requirement of fast walking for humanoid soccer robot, a planning based on GA optimized was presented. Firstly, a walking movement cycle of the humanoid soccer robot was analyzed. During the walking cycle, the movement of the hip was continuous and the ankle was intermittent. So a cubic spline interpolation and a high order polynomial interpolation were used to plan their trajectories respectively. Secondly, the objective function was constructed using zero moment point (ZMP) stability margin as a parameter. In order to obtain a stable gait with larger ZMP stability margin, the planned trajectory was optimized based on the genetic algorithm (GA). Simulation results show that the humanoid soccer robot can walk more stably with the gait planned by the presented approach.

Key words: humanoid soccer robot; gait planning; high order polynomial interpolation; cubic spline interpolation; zero moment point (ZMP); genetic algorithm optimization

0 引 言

由于机器人足球比赛的特殊性, 实现仿人足球机器人的稳定、快速步行已成为影响比赛结果的关键因素。而机器人的双足步行又具有结构复杂、高阶、非线性、强耦合等特点^[1], 一直是该领域研究的难点。

步态规划是实现机器人稳定步行的基础, 它包括关节轨迹插值和关节轨迹优化两方面的工作。在关节轨迹插值中, 研究者常采用三次样条插值来规划各关节运动轨迹^[2], 该方法既能保证插值点两侧轨迹的连续性,

又能实现整条曲线的连续、平滑。但是由于踝关节运动具有间断性的特点, 三次样条插值并不能很好地满足要求。本研究根据踝关节和髋关节运动的不同特点, 分别采用高次多项式插值和三次样条插值规划运动轨迹。

在插值过程中, 插值点参数的选择具有一定的盲目性, 一般情况下研究者难以规划出满意的步态, 必须对步态参数进行优化。常用的优化方法有: 以能量最优为目标, 采用遗传算法优化步态参数^[3]; 以能量最小、关节力矩变化最小为目标优化步态^[4-5]; 以能耗低、落地冲击小为目标, 采用混合编码遗传算法优化步

收稿日期: 2012-06-13

基金项目: 浙江省重点科技创新团队资助项目 (2009R50014)

作者简介: 吴泽琦 (1987-), 男, 浙江杭州人, 主要从事机器人运动规划与控制方面的研究。E-mail: wuzeqi@126.com

通信联系人: 吴根忠, 男, 副教授, 硕士生导师。E-mail: wgz@zjut.edu.cn

态^[6];以 ZMP 稳定裕度最大为目标,采用粒子群优化算法优化步态^[7]等。

由于在机器人足球比赛中,步行的稳定与否对于比赛的结果起着决定性的作用,本研究以 ZMP 稳定裕度最大为目标,采用适合多变量单目标问题优化的遗传算法来优化步态参数,最后通过 Matlab 仿真验证该规划方案的有效性。

1 仿人足球机器人步行过程分析

本研究采用中控集团研制的仿人足球机器人作为研究对象,该机器人具有 20 个自由度,下肢关节具有 12 个自由度(髋关节 3 个,膝关节 1 个,踝关节 2 个)。

仿人足球机器人机构各杆件的参数如表 1 所示。

表 1 机构杆件参数

部件	长度/mm	质量/g
上身	129.0	1 900
大腿 x_2	168.5	337
小腿 x_2	130.5	220
脚踝 x_2	37.5	352

仿人足球机器人步态规划的主要研究对象为下肢 12 个自由度,它的步行过程如图 1 所示,以周期性重复运动的方式不断前进。每一步可分为双足支撑期和单足支撑期。以人类步行为例,双足支撑占整个步行周期的 10%~20%,该实验设定双足支撑期占 20% 的步行周期。图 1 中,AB、DE 阶段为双足支撑期,BD 阶段为单足支撑期,B、D 分别为单足支撑期起始和结束位置。假设 AD 段跨一步为一个周期 T ,则 $t_A \sim t_B$ 为双足支撑期, $t_B \sim t_D$ 为单足支撑期, t_C 为单足支撑期中间时刻。由于受机器人关节舵机控制精度和机械制造工艺的限制,仿人足球机器人的脚掌很难以一定的角度与地面实现线接触,如果以点接触的形式将产生偏转力,使机器人整体的稳定性受到影响,因此在规划整个步态运动中,笔者假定脚掌均与地面平行。

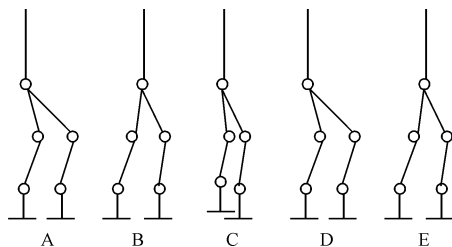


图 1 仿人足球机器人步行过程

2 关节轨迹规划

2.1 髋关节轨迹规划

髋关节的运动规划在整个步态规划中起着关键的

作用,它影响着整个机器人步行运动的稳定性。在步行过程中,髋关节在空间中的运动是一个连续的过程,因此本研究采用三次样条插值来实现髋关节的连续、平滑运动。

本研究在机器人支撑腿脚底中心建立世界坐标系,以机器人前进方向为 X 轴,左侧为 Y 轴,竖直方向为 Z 轴。在 X 方向上,规定在起始 t_A 时刻,髋关节到支撑脚坐标原点的水平距离为 d_{xs} ,在 t_B 时刻,距离为 d_{xe} 。笔者分析三次样条插值方法,一般其使用的情况有 3 类边界条件:第 1 种为给定端点处的 1 阶导数值;第 2 种为给定端点处的 2 阶导数值;第 3 种为插值曲线为周期性连续函数^[8]。对照三次样条插值的适用条件,髋关节在 X 方向上的运动,本研究考虑使用第 3 类周期性条件。但是在使用该插值方法前,对于整个函数应进行适当的变形。虽然髋关节运动具有重复性的特点,但是由于机器人在空间中前进,其位移在数值上随着时间增加。因此,这里引入复合函数:

$$f = x(t) - vt \tag{1}$$

式中: $x(t)$ — 机器人实际位移, v — 机器人在整个运动过程中的平均速度。

这样 f 就成为一个周期函数,其插值点选取如表 2 所示,然后本研究利用 Matlab 的 csape 函数求解三次样条曲线。

表 2 髋关节 X 方向插值点

	t_A	t_B	t_D
$x(t)$	$-d_{xs}$	$-d_{xe}$	$D_s - d_{xs}$
f	$-d_{xs}$	$-d_{xe} - vt$	$-d_{xs}$

在 Y 方向上,髋关节的运动如图 2 所示,整个过程以两步为一个周期,满足周期性变化特点。本研究选取图 2 中 7 个关键点为插值点,应用三次样条插值的周期性条件规划曲线。研究者在单步运动中截取前 3 段规划的曲线即可。

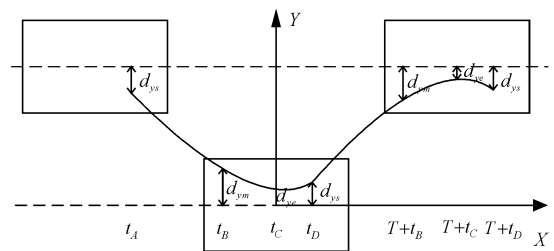


图 2 髋关节 Y 方向运动轨迹

t_A — 双足支撑起始时刻位置; t_B — 双足支撑结束时刻位置(即单足支撑起始); t_C — 单足支撑期中间时刻位置; t_D — 单足支撑结束时刻位置(即双足支撑起始)

在行走过程中,重心高度的变化会引起整个机器

人系统能量的相互转化,为了减少机械能之间的相互转化对机构的影响,研究者可以假设机构在运动过程中高度不变,因此在 Z 方向上,髌关节保持一恒定值。

2.2 踝关节轨迹规划

分析图 1 可知,在整个步行周期中踝关节的运动处在 BD 阶段,即单足支撑期,它的运动具有周期间断性的特点。为了实现踝关节运动的连续、平滑,同时在抬腿与落地阶段减小地面对机器人本体的冲击,在踝关节轨迹规划时,研究者希望两端点处的速度和加速度为零。分析传统的三次样条插值方法可知,该方法并不能满足踝关节两端点处 1 阶、2 阶导数同时为零的要求,进而考虑采用高次多项式来进行曲线插值。

在 X 方向,本研究采用五次多项式规划,如下式所示:

$$x(t) = a_5 t^5 + a_4 t^4 + a_3 t^3 + a_2 t^2 + a_1 t + a_0 \quad (2)$$

起始和终止时刻的速度和加速度为零,跨一步的步长为 D_s ,起始位置为 S_0 ,则:

$$\dot{x}(t_B) = \dot{x}(t_D) = \ddot{x}(t_B) = \ddot{x}(t_D) = 0 \quad (3)$$

本研究采用同样的方式,在 Z 方向以中间时刻 t_c 为摆动腿抬起最高点 H ,采用分段三次多项式插值,以两端点速度为零和中间点位置为插值点。三次多项式为:

$$z(t) = b_3 t^3 + b_2 t^2 + b_1 t + b_0 \quad (4)$$

曲线的起始和终止速度为:

$$\dot{z}(t_B) = \dot{z}(t_c) = 0 \quad (5)$$

在仿人足球机器人的前向直线运动中,摆动腿踝关节在 Y 方向的相对位置为一恒定值。

2.3 膝关节轨迹规划

膝关节的轨迹是建立在踝关节和髌关节轨迹规划完成的基础之上,通过几何关系求解。机器人下肢后视图以及下肢 3 个关节所在平面的侧视图如图 3 所示(在后视图中可见该平面与 XOZ 坐标平面夹角为 φ)。

通过空间几何关系,膝关节各方向的运动轨迹推导如下(其中,字母下标 hip、ankle、knee 分别代表髌关节、踝关节、膝关节空间坐标):

$$\varphi = \angle P_5 P_1 P_4 = \arctan \frac{y_{\text{hip}} - y_{\text{ankle}}}{z_{\text{hip}} - z_{\text{ankle}}} \quad (6)$$

$$\angle P_2 P_1 P_4 = \arctan \frac{|P_2 P_4|}{|P_1 P_4|} = \arctan \frac{x_{\text{ankle}} - x_{\text{hip}}}{(z_{\text{hip}} - z_{\text{ankle}}) / \cos \varphi} \quad (7)$$

$$\angle P_2 P_1 P_3 = \arccos \frac{|P_1 P_2|^2 + |P_1 P_3|^2 - |P_2 P_3|^2}{2 \cdot |P_1 P_2| \cdot |P_1 P_3|} = \arccos \frac{|P_2 P_4|^2 + |P_1 P_4|^2 + |P_1 P_3|^2 - |P_2 P_3|^2}{2 \cdot |P_1 P_3| \cdot \sqrt{|P_2 P_4|^2 + |P_1 P_4|^2}} \quad (8)$$

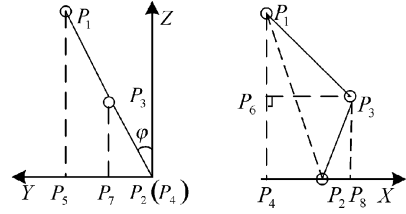


图 3 下肢后视图与侧视图

$P_1 P_3$ —大腿长度; $P_2 P_3$ —小腿长度

$$x_{\text{knee}} = x_{\text{hip}} + |P_1 P_3| \cdot \sin(\angle P_2 P_1 P_4 + \angle P_2 P_1 P_3) \quad (9)$$

$$y_{\text{knee}} = |P_2 P_7| + y_{\text{ankle}} = |P_3 P_8| \cdot \sin \varphi + y_{\text{ankle}} = [|P_1 P_4| - |P_1 P_3| \cdot \cos(\angle P_2 P_1 P_4 + \angle P_2 P_1 P_3)] \cdot \sin \varphi + y_{\text{ankle}} \quad (10)$$

$$\frac{z_{\text{knee}} - z_{\text{ankle}}}{z_{\text{hip}} - z_{\text{ankle}}} = \frac{|P_3 P_7|}{|P_1 P_5|} = \frac{|P_3 P_8|}{|P_1 P_4|} \quad (11)$$

3 步态优化

3.1 目标函数构造

要进行步态优化,首先要构造优化的目标函数。本研究以 ZMP 的稳定裕度,即 ZMP 到稳定区域边缘的最短距离为参数构造目标函数。ZMP 的近似计算公式^[9]如下:

$$x_{\text{zmp}} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i [(z_i + g)x_i - z_i x_i]}{\sum_{i=1}^n m_i (z_i + g)} \quad (12)$$

$$y_{\text{zmp}} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i [(z_i + g)y_i - z_i y_i]}{\sum_{i=1}^n m_i (z_i + g)}$$

式中: m_i —各杆件质心质量, (x_i, y_i, z_i) —各质心位置, g —重力加速度。

在单足支撑期的第 i 个采样时刻,设沿脚掌前进方面为 X 轴,侧向为 Y 轴,ZMP 到支撑脚掌中心的距离分别为 r_x 和 r_y ,构造函数如下:

$$f(r_x, r_y) = \alpha r_x^2 + \beta r_y^2 \quad (13)$$

式中: α, β —权重值。

由于在单足支撑期,支撑脚掌在 X 方向的稳定区域大于 Y 方向,因此权重取脚掌长宽比,即 $\alpha/\beta = W_{\text{foot}}/L_{\text{foot}}$,且 $\alpha + \beta = 1$ 。

本研究将单足支撑期内 n 个采样时刻的函数值求和,得到单足支撑期的目标函数:

$$J_s = \alpha \sum_{i=1}^n r_{xi}^2 + \beta \sum_{i=1}^n r_{yi}^2 \quad (14)$$

即式(14)取值越小,说明 ZMP 的稳定裕度越大,行走就越稳定。

在双足支撑期,本研究设 ZMP 到两脚掌组成的多边形中心点距离为 r_s ,取 m 个采样时刻距离 r_s 的平方和作为双足支撑期目标函数:

$$J_d = \sum_{j=1}^m r_{sj}^2 \quad (15)$$

则总的目标函数为:

$$J = J_s + J_d \quad (16)$$

3.2 基于遗传算法的步态优化

仿人足球机器人的自由度较多,数学模型复杂,采用一般的方法难以找到全局最优解。与传统方法相比,通过遗传算法能够最大程度地实现全局最优,对问题本身的依赖也较少,这些特征使得 GA 很适合求解多变量单目标的约束优化问题^[10-11]。本研究应用 GA 对仿人足球机器人规划的步态,以 ZMP 稳定裕度最大为目标进行优化。整个算法的设计步骤如下:

(1) 确定待优化的变量及约束条件。由于髋关节运动对整个机器人运动的稳定性起着决定性作用,这里主要优化髋关节的几个变量 ($d_{xs}, d_{xe}, d_{ys}, d_{ym}, d_{ye}$)。其位置约束如下式:

$$\begin{aligned} 0.4D_s < d_{xs} < 0.9D_s \\ 0.1D_s < d_{xe} < 0.3D_s \\ 0 < d_{ys} < \frac{W_{hip}}{2} \\ 0 < d_{ym} < \frac{W_{foot}}{2} \\ 0 < d_{ye} < \frac{W_{foot}}{2} \end{aligned} \quad (17)$$

式中: W_{hip} —两髋关节距离, W_{foot} —脚掌宽度, D_s —步长。

(2) 目标函数的构造。以 $J = J_s + J_d$ 为目标函数,当 J 取值越小,则表示机器人在单、双足支撑期的 ZMP 稳定裕度最大。

(3) 确定 GA 的编码方法为标准的二进制编码,个体的适应度的量化可以采用基于排序的适应度分配计算来实现。

(4) 确定 GA 的选择、交叉、变异等基因操作方法及各参数的取值。

4 仿真结果及分析

仿人足球机器人相关参数如下:脚掌宽 W_{foot} 为 0.078 m,长 L_{foot} 为 0.148 m,两髋关节间距 W_{hip} 为

0.103 4 m。仿真参数的单步长 D_s 为 0.05 m,单步周期 T 为 0.5 s,摆动腿踝关节最大高度 H 为 0.03 m。

在 Matlab 7.11 环境下,本研究采用 Gatoool 遗传算法工具箱,取种群规模 $N_p = 40$,进化代数 $T = 100$,交叉概率 $P_c = 0.6$,变异概率 $P_m = 0.05$ 。优化前和优化后的稳定裕度比较如表 3 所示。

表 3 优化前、后稳定裕度比较

	d_{xs}	d_{xe}	d_{ys}	d_{ym}	d_{ye}	J
优化前	0.03	0.01	0.03	0.03	0.01	0.009 3
优化后	0.032	0.009	0.035	0.033	0.003	0.004 2

优化前后 ZMP 的运动轨迹,如图 4、图 5 所示,其中虚线为双足支撑期(轨迹从 a 到 b),实线为单足支撑期(轨迹从 b 到 c)。

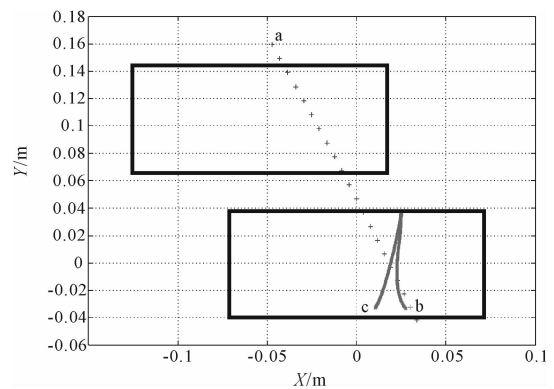


图 4 优化前 ZMP 运动轨迹

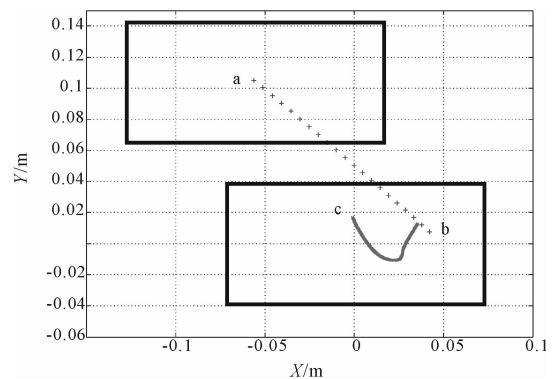


图 5 优化后 ZMP 运动轨迹

在图 4 中,优化前 ZMP 的运动轨迹在双足支撑期的起始及终止时刻,部分 ZMP 轨迹在两脚底面所构成的稳定区域之外,机器人有可能发生倾倒。而在整个单足支撑期的起始、中间和结束时刻,ZMP 的稳定裕度也很小,邻近稳定区域边界,机器人行走稳定性很差。在图 5 中,优化后 ZMP 的运动轨迹无论是在双足支撑期还是单足支撑期,均能保证较大的稳定裕量,从而提高了机器人行走的稳定性,具有更强的抗干扰能力。

5 结束语

针对仿人足球机器人步态运动中的特点,本研究采用三次样条插值来规划髋关节运动轨迹,使得机器人上肢运动轨迹平滑、连续;采用高次多项式插值来规划踝关节运动轨迹,减小了摆动腿在抬起与落地阶段对机器人本体的冲击。

同时,本研究利用遗传算法优化规划的步行参数,从而保证了机器人的 ZMP 在整个运动过程中具有一定的稳定裕量,提高了机器人步行的稳定性。

参考文献 (References):

- [1] KIM S, KIM C, YOU B. Stable Whole-body Motion Generation for Humanoid Robots to Imitate Human Motions [C]// The 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Saint Louis: IEEE, 2009: 2518-2524.
- [2] 黄春林, 张 祺, 杨宜民. 三次样条插值方法在 Nao 机器人步态规划中的应用 [J]. 机电工程技术, 2011, 40(2): 62-64.
- [3] 伊 强, 陈 息, 刘 莉, 等. 考虑综合行走约束的仿人机器人参数化 3D 步态规划方法 [J]. 机器人, 2009, 31(4): 342-350.

- [4] HU L, ZHOU C, SUN Z. Biped Gait Optimization using Spline Function based Probability Model [C]// The 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Orlando Florida: IEEE, 2006: 830-835.
- [5] PHUONG N T, DAE W K, HAK K K, et al. An Optimal Control Method for Biped Robot with Stable Walking Gait [C]// 2008 8th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots. Daejeon: IEEE, 2008: 211-218.
- [6] 杨 鹏, 孔 鑫, 赵 奇, 等. 基于混合编码遗传算法的双足机器人步态规划 [C]// 中国控制与决策学术年会论文集. 辽宁: 《控制与决策》杂志社, 2006: 1285-1289.
- [7] 付根平, 杨宜民, 黄春林. 基于粒子群优化算法的双足机器人步态优化 [J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2011, 39(52): 355-358.
- [8] 刘 为, 高 尚. 一种新条件下的三次样条插值 [J]. 信息技术, 2011(8): 23-24.
- [9] 梶田秀司. 仿人机器人 [M]. 管贻生, 译. 北京: 清华大学出版社, 2007.
- [10] 林德龙. 舵机驱动仿生四足机器人设计 [J]. 机械, 2011, 38(2): 66-69.
- [11] 徐李超, 张 祺. 一种仿人机器人步态优化的新方法研究 [J]. 广东工业大学学报, 2012, 29(1): 50-54.

[编辑: 李 辉]

(上接第 1336 页)

光。节点模块数据收发天线采用单端非平衡倒 F 型 PCB 天线, 与电路板一体, 数据多跳传输满足收发距离要求, 在室内障碍空间传输距离可达 80 m 以上, 在空旷无障碍空间可达 150 m 以上, 若附加 CC2591 距离扩展器模块可增加至 250 m 以上。综上所述, 该系统设计均符合设计要求。

5 结束语

该系统是基于 ZigBee 无线传感网络的一个典型应用, 照明模式有手控、自控模式可选, 在满足用户合理照明度的前提下最大限度减少“长明灯”现象, 降低电能消耗, 克服了传统照明控制系统布线复杂、管理落后、单一控制、电能浪费等缺陷。

实验测试结果表明, 该 LED 照明系统实现了“传感器节点实时采集环境参数, ZigBee 遥控器准确控制, PC 上位机集中管理”的设计目标, 目前在智能建筑、智能家居的高档别墅和住宅中具有很大市场竞争力, 同时随着住户对照明品质的要求越来越高, 应用前景十分广阔。

参考文献 (References):

- [1] 石赛兰. 太阳能 LED 路灯节能控制系统设计 [J]. 机电工程技术, 2010, 39(12): 61-62.

- [2] 周志敏, 纪爱华. LED 灯设计与应用 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2009.
- [3] 王旭升. 基于 ZigBee 的智能建筑灯光控制系统设计 [J]. 机电工程技术, 2011, 40(12): 22-25.
- [4] IEEE. 802. 15. 4, Part 15. 4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Network (LR-WPANs) [S]. [s. n.], 2003.
- [5] 崔 莉, 鞠海玲, 苗 勇, 等. 无线传感器网络研究进展 [J]. 计算机研究与发展, 2005, 42(1): 166-174.
- [6] Jennic. Jennic 802. 15. 4 Stack API Reference Manual (JN-RM-2002) [M]. Jennic, 2007.
- [7] Jennic. Jennic ZigBee Application Development API Reference Manual (JN-RM-2014) [M]. Jennic, 2007.
- [8] CC253X User's Guide [EB/OL]. [2010-06-25]. <http://focus.ti.com/docs/prod/folders/print/cc2530.html>.
- [9] CALLAWAY E H. Wireless Sensor Network: Architecture and Protocol [M]. Ohio: CRC Press, 2004.
- [10] EDGAR H C. Wireless Sensor Networks: Architectures [M]. Florida: CRC Press LLC, 2004.
- [11] Siemens Company. TC35i AT command set [M]. Ver3. 01. Siemens Company, 2003.
- [12] Siemens Company. TC35i Hardware Interface Description Product Specification [M]. Siemens Company, 2003.

[编辑: 李 辉]