

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2018.11.019

# AGV 轨迹规划及其纠偏控制机理研究\*

杨前明,张君,阮益

(山东科技大学机械电子工程学院,山东青岛 266590)

**摘要:**针对重型 AGV 定位精度差及其纠偏能力弱的问题,阐述了 AGV 偏差形成原因及其纠偏控制方法,对 AGV 纠偏运动控制模型、纠偏控制系统进行了研究。建立了 AGV 轨迹规划数学运动模型以及直流电机 PWM 纠偏调速控制模型,采用 Matlab 软件进行了仿真,获得了 AGV 运动曲线与 PID 纠偏控制曲线特性规律;给出了现场实验测试方法,进行了实验样机现场运行与测试,获得了 AGV 实际运行与理想轨迹的偏差数据。研究表明:采用直流电机 PWM 调速与 PID 纠偏控制算法后,系统能够稳定快速校正 AGV 的轨迹偏差,响应时间约为 3 s,实验测量数据误差小于  $\pm 10$  mm。

**关键词:**PWM 调速;PID 控制;Matlab;纠偏精度

**中图分类号:**TP242;TP273

**文献标志码:**A

**文章编号:**1001-4551(2018)11-1243-05

## Research on AGV track planning and trajectory correction

YANG Qian-ming, ZHANG Jun, RUAN Yi

(College of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong University  
of Science and Technology, Qingdao 26659, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of poor precision and rectifying deviation of AGV, the cause of AGV deviation formation and its correction control method were studied. The AGV correction motion control model and the correction control system were studied. A mathematical motion model of AGV trajectory planning and a PWM rectifying speed control model of DC motor were established, and AGV motion curve and the characteristics of PID rectifying control curve were also obtained through simulation by using the Matlab software. The field operation and test of the experimental prototype were carried out, and the deviation data of the actual operation of AGV and the ideal track were obtained. The results indicate that the system can rectify the trajectory deviation of AGV quickly and stably, and the response time is about 3.5 s by using the DC motor PWM speed regulation and the PID correction algorithm. That the error of experimental data is within  $\pm 10$  mm.

**Key words:** PWM speed regulation; PID control; Matlab; correction accuracy

## 0 引言

无人数字工厂是棉纺车间未来的发展方向<sup>[1]</sup>。由于棉纺车间存在高温、高湿度、高噪音特点,机器人换人势在必行。因此,为纺织车间设计的背负式棉桶更换复合机器人应运而生。

磁导航式差速 AGV 在前进、转向过程中,路面平整度问题会对 AGV 行驶产生一定定位精度影响;导航

磁带直线度误差以及 AGV 由直道转入弯道或者由弯道转入直道等情况,也会致使 AGV 在行驶过程中产生偏差。

国内外关于纠偏控制的研究较多,像多窗口实时测距<sup>[2]</sup>、串级轨迹跟踪算法、卡尔曼滤波器定位等<sup>[3]</sup>,这些算法以及控制方法比较适合于无轨导航,工程上经常采用 PID 算法对 AGV 行驶轨迹进行实时的纠偏<sup>[4-5]</sup>,PID 控制器、模糊控制器以及模糊 PID 比较适合于有轨导航。

收稿日期:2018-03-17

基金项目:青岛市科学计划资助项目(QDKJX-201305-066)

作者简介:杨前明(1960-),男,江苏如皋人,博士,教授,主要从事机电一体化控制方面的教学与研究工作。E-mail:yqm8396@163.com

在磁导引中,在实现 AGV 的导引前提下,也不断研究 AGV 的定位以及纠偏方法,提高 AGV 的定位精度。PWM 调速是利用功率开关的器件的导通与关断,将直流电压变成连续的直流脉冲序列,并通过控制脉冲宽度或周期达到变压调速的目的。

本文以 PLC 为控制器,基于 PWM 调速与 PID 控制,探讨直流电机调速与 AGV 纠偏调速控制系统的实现方法。

## 1 AGV 纠偏模型建立

### 1.1 AGV 运动学模型建立

自主式磁导航 AGV 在行驶过程中,随着纠偏传感器位置信号连续采集送入控制器,同时给定直流电机纠偏信号不断接近目标轨迹。

本研究以固定点  $O$  为参考点,建立固定参考坐标系  $I[X-O-Y]$ ;以 AGV 上质心点  $P$  作为 AGV 局部参考系位置参考点,建立局部参考系  $II[X_R-P-Y_R]$ <sup>[6]</sup>,如图 1 所示。

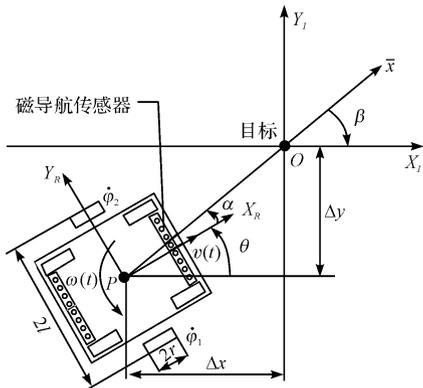


图 1 AGV 纠偏环节运动模型

则  $P$  点的位置坐标为  $(X, Y)$ , 两坐标之间的角度差为  $\theta$ ,  $P$  点的位姿可以表示为  $P = [x, y, \theta]^T$ 。对于双轮差速驱动下 AGV, 给定右轮转速为  $\dot{\varphi}_1$ , 左轮转速为  $\dot{\varphi}_2$ , 根据图 1 所示几何关系, 左右轮线速度为:

$$\begin{cases} V_R = \varphi_1 r \\ V_L = \dot{\varphi}_2 r \end{cases} \quad (1)$$

AGV 车体的角速度和线速度为:

$$\begin{cases} \omega(t) = \frac{V_R - V_L}{2l} \\ v(t) = \frac{V_R + V_L}{2} \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $r$ — 车轮半径, mm;  $l$ — 质心  $P$  点至两轮距离, mm;  $V_R$ — 右轮运动速度, mm/s;  $V_L$ — 左轮运动速度, mm/s。

差速驱动 AGV 的运动学模型为:

$$\dot{\xi}_1 = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r\dot{\varphi}_1 + r\dot{\varphi}_2 \\ 0 \\ r\dot{\varphi}_1 - r\dot{\varphi}_2 \\ 2l \end{bmatrix} \quad (3)$$

### 1.2 纠偏调速系统数学模型建立

在图 1 所示的参考系中,在参考系  $P\{X_R, Y_R, \theta\}$  中, AGV 上点  $P(x, y, \theta)$  是其实时位置坐标,参考系  $I$  中点  $O$  为其目标位置,  $OP$  之间距离偏差为  $(\Delta x, \Delta y)$ , 为  $II$  平面  $X_R$  轴与目标位置向量之间的夹角,即偏差角。

在坐标系  $I$  中, AGV 运动模型可表述为:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 \\ \sin\theta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} \quad (4)$$

其极坐标可描述为:

$$\rho = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2} \quad (5)$$

$$\alpha = -\theta + \arctan2(\Delta y, \Delta x) \quad (6)$$

$$\beta = -\theta - \alpha \quad (7)$$

在新的极坐标中,得到一个系统描述为:

$$\begin{bmatrix} \dot{\rho} \\ \dot{\alpha} \\ \dot{\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\cos\alpha & 0 \\ \frac{\sin\alpha}{\rho} & -1 \\ -\frac{\sin\alpha}{\rho} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} \quad (8)$$

为使 AGV 从  $P$  点移动目标位置  $O$  点,本研究给定 AGV 左右轮控制信号  $\dot{\varphi}_1, \dot{\varphi}_2$ , 获得 AGV 运动参数  $v$  与  $\omega$ 。

从式(8)中可以看出,当  $\rho = 0$  时出现不连续性,但 Brockett 定理不妨碍平滑稳定性<sup>[7]</sup>,即:

$$v = k_\rho \rho \quad (9)$$

$$\omega = k_\alpha \alpha + k_\beta \beta \quad (10)$$

由式(8)可得到闭环控制系统的数学模型为:

$$\begin{bmatrix} \dot{\rho} \\ \dot{\alpha} \\ \dot{\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_\rho \rho \cos\alpha \\ k_\rho \sin\alpha - k_\alpha \alpha - k_\beta \beta \\ -k_\rho \sin\alpha \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中:  $\rho$ — AGV 轮轴的中心与目标位置之间的距离, mm;  $k_\rho$ — 偏差距离控制参数;  $k_\alpha$ — 偏差角度  $\alpha$  控制参数;  $k_\beta$ —  $\beta$  角控制参数。

### 1.3 纠偏原理

由上述数学模型分析可知: AGV 的位置纠偏一直贯穿于其行驶过程,轨迹跟踪就是减少 AGV 行驶过程中实际轨迹与预定轨迹间的距离偏差  $\rho$  与角度偏差  $\alpha$ <sup>[8]</sup>。

当  $\rho = 0$  时,即  $(\rho, \alpha, \beta) = (0, 0, 0)$  是一个唯一的

平衡点,直流电机驱动 AGV 行驶至该位置,这就是目标位置。

AGV 通过接收磁导航传感器的位置信息,判断此时与预定轨道的位置。若 AGV 发生偏转,与预定轨道的距离偏差为  $\rho$ ,角度偏差  $\alpha$ ,控制器通过 PID 指令向驱动电机发送调节指令,对 AGV 轨迹纠偏回归到预定轨道。此时磁导航传感器将位置信号传递给 PLC,PLC 根据磁导航输出的信号进行处理,从而发出相应的控制指令调节直流电机转速<sup>[9]</sup>。

## 2 直流电机纠偏控制系统

### 2.1 直流电机调速控制系统

本研究采用 PWM 的调速方式实现对电机转速以及电流的控制。在直流无刷电机控制系统中,采用电流内环、PID 外环的闭环控制<sup>[10]</sup>,直流电机动态 PWM 调速模型如图 2 所示。

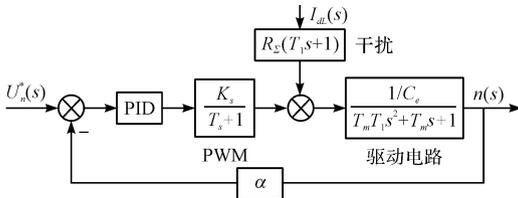


图 2 直流电机动态 PWM 调速模型

无刷直流电机调速系统常常会受到一定外界干扰,虽然直流电机在一定程度上可以对随机干扰进行调节,但是当系统输入值受到外界干扰产生变化时,同时也会引起输出值的变化。若这些偏差不能及时处理,就会产生一定误差。采用 PID 控制进行补偿,减少干扰对转速的影响是通常采用的方法之一<sup>[11]</sup>。

### 2.2 PID 纠偏实现方法

将 AGV 运动过程以左、右轮转速偏差  $\Delta v$  的方式体现,用  $e$  表示,输出  $u$  为两驱动电机控制电压,则传统的位置式 PID 纠偏控制表达式可以表示为:

$$\begin{cases} u(k) = K_p e(k) + K_I \sum_{i=0}^k e(k) + K_D e_c \\ e_c = e(k) - e(k-1) \end{cases} \quad (12)$$

式中: $e(k)$ ,  $e_c$ —系统偏差和系统偏差变化率; $K_p, K_I, K_D$ —比例系数、积分系数和微分系数。

由上式可知,位置式 PID 算法需要对偏差  $e$  进行累加求和,每次输出均与以前的状态相关,计算时需要将  $e(k)$  进行累加,工作量比较大。为了避免初次启动造成瞬间微分值过大的缺点,本研究采用监看测定值 ( $PV$ ) 的微分状况,PID 指令控制框图如图 3 所示。

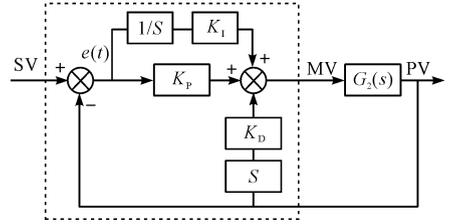


图 3 PID 指令控制框图

则 PID 表达式为:

$$\begin{cases} u(k) = K_p e(k) + K_I \sum_{i=0}^k e(k) + K_D u_{pv}(k) \\ e_k = u_{sv}(k) - u_{pv}(k) \end{cases} \quad (13)$$

式中: $u(k)$ —输出值; $u_{sv}(k)$ —目标值; $u_{pv}(k)$ —测定值。

PID 控制原理是将输入值  $SV$  与测定值  $PV$  偏差  $e$  输入 PID 控制器中,设定 PID 控制中的  $K_p, K_I, K_D$  3 个参数,对直流电机进行调速<sup>[12-13]</sup>。

该指令采用监看测定值  $PV$  的微分状况,当测定值  $PV$  变化量过大时,即车轮速度变化量过大时,则将会降低输出值  $MV$  的输出,从而以 PWM 波的形式输出对电机进行调速。

PLC 作为控制器,通过其内部 PID 处理器,将输入输出信号进行 AD 转换。基于 PLC 的 PID 指令,首先要进行参数初始化,在指定时间点上向模拟量取值,取出模拟量后,需要采用模拟量输入 (A/D) 转换模块进行模拟量输入,最后通过模拟量输出模块 (D/A) 输出或采用 PWM 波形输出<sup>[14]</sup>。

## 3 仿真与实验分析

### 3.1 仿真模型建立

根据图 2 可知,直流电机 PWM 调速环节的传递函数为<sup>[15]</sup>:

$$G_0(s) = \frac{K_s}{T_s s + 1} \quad (14)$$

式中: $K_s$ —PWM 变换器放大系数, $K_s = \overline{U_d}/U_d$ ;  $\overline{U_d}$ —PWM 变换器输出的空载平均电压,2.5 V;  $U_d$ —PWM 变换器的控制电压,5 V;  $T_s$ —PWM 变换器的平均滞后时间,1/2 000 s。

直流电机经 PWM 调速后的转速与输入电压传递函数为:

$$G_1(s) = \frac{K_s}{(T_s s + 1)(T_m T_1 s^2 + T_m s + 1)} \quad (15)$$

式中: $C_e$ —电动势常数,0.2;  $T_m$ —电气传动时间常数,0.009 8;  $T_1$ —时间常数, $L/R_\Sigma$ ;  $L$ —电枢回路总电感,0.18 mH;  $R_\Sigma$ —电枢回路总电阻,0.18  $\Omega$ 。

PID 环节传递函数为:

$$G_2(s) = K_p + K_i \cdot \frac{1}{s} + K_d s \quad (16)$$

直流电机 PID 调速控制系统闭环传递函数为:

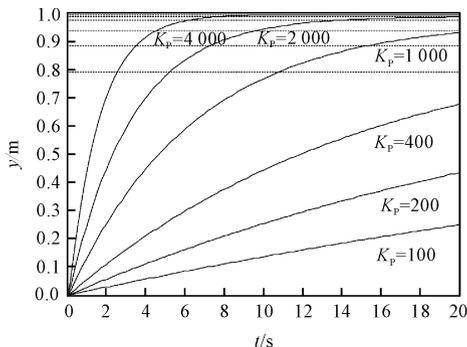
$$G(s) = \frac{G_1(s)G_2(s)}{1 + \alpha G_1(s)G_2(s)} \quad (17)$$

式中: $\alpha$ —反馈系数,0.015 V·min/r。

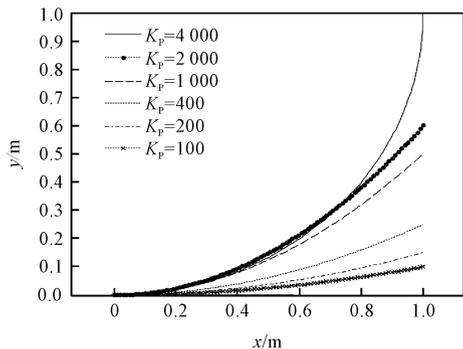
### 3.2 系统仿真及分析

系统仿真的思想是根据直流电机 PID 调速控制系统的传递函数,考查在不同 PID 参数下其响应曲线特征规律。

PID 参数采用临界比例度法<sup>[16]</sup>,按照 P-I-D 环节操作顺序,整定参数。PID 参数调节过程及 AGV 运行轨迹如图 4 所示。



(a) PID 参数调节过程



(b) PID 调节 AGV 运行轨迹

图 4 PID 参数调节过程及 AGV 运行轨迹

经 Matlab 仿真,在参数整定后得到的理想的 AGV 纠偏阶跃响应曲线如图 5 所示。

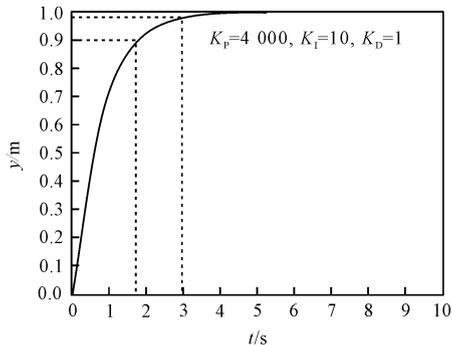


图 5 AGV 纠偏阶跃响应

由图 5 可知: $K_p=4\ 000, K_i=10, K_d=1$  时,系统响应快速、性能稳定,无超调、无振荡,调节时间约为 3 s,满足纠偏性能要求。

根据式(4,8),对直流电机进行纠偏调速,可得到 AGV 轨迹仿真曲线,如图 6 所示。

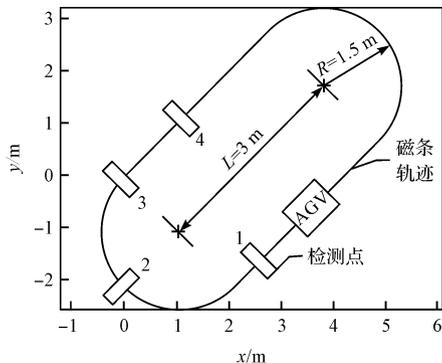


图 6 AGV 轨迹仿真曲线及实验原理图

图 6 中,AGV 以(0,0)点为起始点,直线距离为 3 m,弯道半径为 1.5 m 的环形跑道进行行驶,该仿真轨迹基本与标准轨迹重合,满足纠偏要求。

### 3.3 实验测试与分析

图 6 中,磁条轨迹与 AGV 构成了系统测试方案,在模拟作业区铺设磁条轨迹,复合机器人沿着磁条轨迹进行试运行。

为进一步分析调节参数对电机调速的影响,笔者让 AGV 沿着固定轨迹进行连续行驶,在 AGV 运行轨迹上设置 4 个检测点,并分别在 4 个检测点粘贴白纸,使白纸的中心位置与磁条的中心位置重合,以蓝线标识。AGV 沿着磁条运行,当运行到检测点时,固定在车体中心处的记号笔将会在白纸上留下 AGV 运行痕迹,并检测实际轨迹与理想轨迹的偏差距离,以磁条中心线右侧的偏差为正。

现场实际运行测试如图 7 所示。

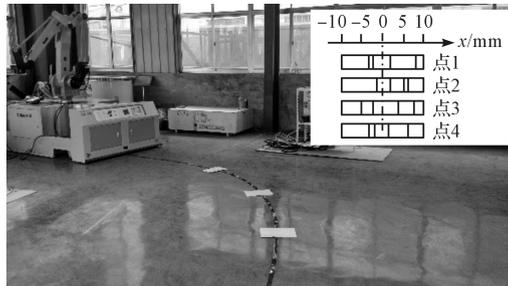


图 7 现场模拟运行实验测试照片

图 7 中右上角给出了 AGV 轨迹上 4 个点的实验纠偏检测结果分布情况。当  $K_p$  过小时,实际轨迹偏差较大;当  $K_p=4\ 000$  时,实际轨迹偏差较小。

不同调节参数下 AGV 上某固定点与标准轨迹间

的偏差  $\Delta x$  测试如表 1 所示。

表 1 AGV 偏差距离表

参数值 $K_p$	检测点偏差值 $\Delta x/\text{mm}$			
	检测点 1	检测点 2	检测点 3	检测点 4
100	80	-85	87	90
200	-65	64	65	-67
400	50	55	-57	60
1 000	22	-25	-27	25
2 000	-17	-18	15	15
4 000	4	3	6	5

由图 7 以及表 1 可以看出:当  $K_p = 4\ 000$  时,经过多次实验,检测到在检测点的偏差平均值在  $\pm 10\ \text{mm}$  以内,满足 AGV 的定位要求,同时根据实际 AGV 行驶路径以及仿真路径发现,AGV 运行轨迹与标准轨迹基本一致。

## 4 结束语

针对纺织车间棉桶搬运自动化问题,本文提出了复合机器人及配套技术总体解决方案:

(1)针对复合机器人纠偏调速问题,本文建立了其基于轨迹跟踪系统运动学模型,运用 Matlab 软件进行了仿真,结果表明:AGV 运行轨迹与标准轨迹基本重合,验证了基于轨迹跟踪系统运动学建模方法的正确性;

(2)针对直流电机 PWM 调速方式,本文给出了基于 PID 控制的直流电机脉宽调速方法,建立了系统数学模型,采用 Matlab 进行了仿真。结果显示:纠偏过程无超调、无振荡、调节速度快;对现场实验测试表明:复合机器人运行轨迹上检测点的偏差  $< \pm 10\ \text{mm}$ ,满足 AGV 定位精度要求。

现场运行过程发现,AGV 能够平稳运行,可以实现自主导航以及纠偏功能,纠偏效果较好,可以完成定点停靠以及棉桶的搬运工作。

## 参考文献 (References):

- [1] 刘金珠,李颖新,罗丹,等.基于智能技术打造无人化数字棉纺工厂[J].纺织导报,2014(1):47-51.
- [2] 张建鹏,楼佩煌,钱晓明,等.多窗口实时测距的视觉导引

AGV 精度定位技术研究[J].仪器仪表学报,2016,37(6):1356-1362.

- [3] 尹晓红,赵韩,吴焱明,等.基于卡尔曼滤波的自动导引车串级轨迹跟踪控制[J].农业机械学报,2010,41(2):180-184.
- [4] 罗哉,刘慧平,胡晓峰,等.视觉导引 AGV 纠偏算法研究[J].计算机仿真,2016,33(1):373-377.
- [5] 葛江,亚赫雷,曹维清,等.基于模糊 PID 控制的 AGV 控制[J].兵工自动化,2017,36(12):76-79.
- [6] 曹其新,张蕾.轮式自主移动机器人[M].上海:上海交通大学出版社,2012.
- [7] R·西格沃特,I·R·诺巴克什,D·卡拉穆扎.自主移动机器人导论[M].西安:西安交通大学出版社,2013.
- [8] PRATAMA P S, NGUYEN T H, KIM H K, et al. Positioning and obstacle avoidance of automatic guided vehicle in partially known environment[J]. **International Journal of Control, Automation and Systems**, 2016, 14(6):1572-1581.
- [9] 陈慧蓉,李中望,张松兰.自动控制技术及应用[M].北京:电子工业出版社,2014.
- [10] 蔡红萍,吴乐彬,胥芳.基于自整定模糊 PID 控制的直流无刷电机调速系统研究[J].机电工程,2016,33(8):991-996.
- [11] 王雷,蒋静坪.无刷直流电机自适应补偿最优状态反馈速度控制[J].中国电机工程学报,2008,28(24):101-107.
- [12] 王庆明,孙怡.基于模糊 PID 控制的直流电机同步控制系统[J].机电工程,2012,29(5):493-496.
- [13] 盖超文.基于单片机嵌入式的电机控制系统研究[J].机械,2017(5):42-44.
- [14] BAKAR A B B, MOHMAD S S, ADAM I. Navigation of an automated guided vehicle based on Sugeno inference engine[J]. **Journal of Applied Sciences**, 2016, 16(12):570-579.
- [15] 白晶,刘德君.运动控制系统[M].北京:高等教育出版社,2012.
- [16] 孙跃光,林怀蔚,周华茂.基于临界比例度法整定 PID 控制器参数仿真研究[J].现代电子技术,2012,35(8):192-194.

[编辑:李辉]

## 本文引用格式:

杨前明,张君,阮益,等. AGV 轨迹规划及其纠偏控制机理研究[J]. 机电工程,2018,35(11):1243-1247.

YANG Qian-ming, ZHANG Jun, RUAN Yi. Research on AGV track planning and trajectory correction[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2018,35(11):1243-1247.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>