

基于 EtherCat 总线的高速多轴联动智能弯管机控制系统

林华章

(宁波钜智自动化装备有限公司, 浙江 宁波 315000)

摘要: 弯管机作为管件弯曲成型的主要机械设备, 广泛应用于各行业领域。随着竞争力水平提高, 市场对弯管机在效率和自动化程度方面提出了更高的要求。针对侧弯式弯管机的特点, 提出一种基于 EtherCat 总线的伺服运动控制系统。该控制系统有着更强大的数据处理能力, 能保证各个轴的动态连续性和控制精度, 充分满足各种不同大小、不同角度的管件弯管需求。

关键词: 伺服控制; 侧弯式弯管机; EtherCat 总线

中图分类号: TM 921.54⁺1 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2019)09-0036-05

High Speed and Multi-Axis Motion Control System of Intelligent Pipe Bending Machine by Using EtherCat Bus

LIN Huazhang

(Ningbo Triz Automatic Equipment Co., Ltd., Ningbo 315000, China)

Abstract: As the main mechanical equipment of pipe bending forming, pipe bending machine was more and more widely used in all walks of life. With the improvement of competitiveness, the market had put forward higher requirements on the efficiency and automation of the pipe bending machine. Aiming at the characteristics of side bending machine, a servo motion control system based on EtherCat bus was proposed. The control system had more powerful data processing ability, which could ensure the dynamic continuity and control accuracy of each axis. The needs of pipe benders with different sizes and angles could be fully met.

Key words: servo control; side bending machine; EtherCat bus

0 引言

随着国内经济的发展, 弯管机在越来越多的领域得到了广泛应用, 如航空航天、船舶、汽车制造、家居、石油化工等行业。各种各样的弯管设备应运而生, 然而不能满足市场对管件的成型质量、成形精度和加工效率提出的更高要求^[1]。目前弯管市场上多数弯管机均为液压控制或以运动控制卡和步进电机为主要运动单元的弯管机, 速度较慢、换模调试复杂、精度较低, 模具层数在 4 层以内, 无法加工出更为复杂的管型^[2]。国外虽然有更为先进的弯管机, 但价格昂贵, 且维修更换成本高。弯管机是管件弯曲加工的主要设备, 核心是

控制系统, 因此采用先进的控制技术来升级弯管机势在必行。

为了满足国内对弯管管件越来越高的需求, 本文开发了一种新型侧弯式弯管机, 采用伺服电机和现场总线作为基本控制单元, 大大提高了多轴协同运动的能力和速度。以侧弯为特点的弯管方式, 可双向转换, 轻松实现了 8 层模的复杂弯管功能, 与传统弯管机相比加工效率有很大的提高。

1 侧弯式弯管机简介

侧弯式弯管机原理与传统弯管机原理基本一致, 具有弯管臂、夹模、导模、送料小车、芯棒小车、

作者简介: 林华章(1981—), 男, 工程师, 研究方向为自动化控制及装备智能制造。

束管夹等基本部件。弯管机的简单结构图^[2]如图1所示。

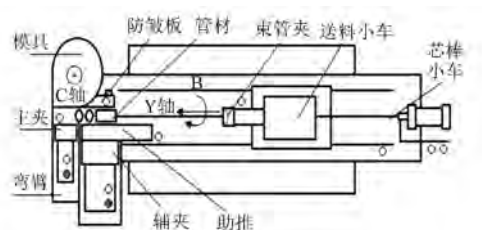


图1 弯管机的简单结构图

模具根据加工的管件大小可更换;主夹把管件夹紧在模具上;弯臂用来弯曲管件;辅夹可以将助推模顶在模具上使之贴合;工作时助推和弯臂以及送料小车一起动作使管件发生弯曲;防皱板用来防止管子在弯曲过程中发生褶皱;束管夹夹住管件,可以使管材转动来调节角度;芯棒插入管件内部,防止管件在弯曲过程中发生变形^[3]。侧弯式弯管机和传统弯管机的区别主要体现在机头上。传统弯管机机头只能单边加工和单边装模具;而侧弯式弯管机的机头可以旋转,两边均可装模具和加工,可以加工出更为复杂的管型。侧弯式弯管机如图2所示。

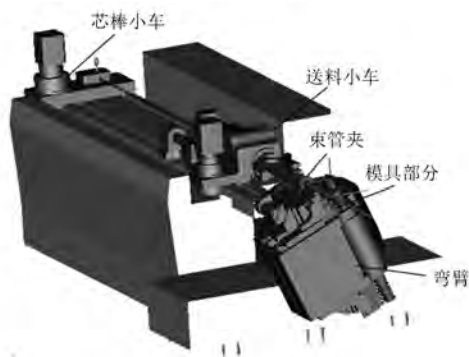


图2 侧弯式弯管机

2 侧弯式弯管机基本控制原理

侧弯式弯管机的优点是可以使用更多层的模具,而无需占用更大的空间,同时可以将某一侧弯无法实现加工的管型通过换侧实现向另一侧弯曲,从而完成弯管要求。为了使机头在任何情况下均能准确地识别出管子位置并使模具夹住管件,需要对机头的平移轴 Q 轴和旋转轴 R 轴位置以及模具的位置进行精确计算。

由于弯管模具经常根据管件尺寸更换,模具位置是一个变量,而机床的自身参数固定,如何让机床的控制系统识别出模具的位置并准确定位呢?可将设备的坐标分为2种,一种是针对机床本身定位的,称为机床坐标系,用 Q 、 R 表示;另一种是针对模具的,称为模具坐标系,用 M 、 N 表示。机床的坐标是直接给伺服电机输出的,而模具坐标系是用来判断管件和模具之间位置关系的,但模具坐标最终均要转换成机床坐标来输出。机头换向分为出模、移动和进模3个阶段。其中出入模具为模具坐标系下的轨迹规划,机头移动时为机床坐标下的轨迹规划。不同的模具在同一个位置所对应的机床坐标是不一样的,因此如何实现模具坐标系与机床坐标系的相互转换就成了关键。图3所示为模具坐标系 M 、 N 与机床坐标系 Q 、 R 的关系。图4所示为坐标系在机头的对应位置示意图。

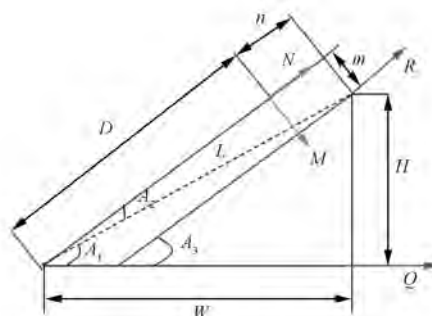


图3 模具坐标系 M 、 N 与机床坐标系 Q 、 R 关系图

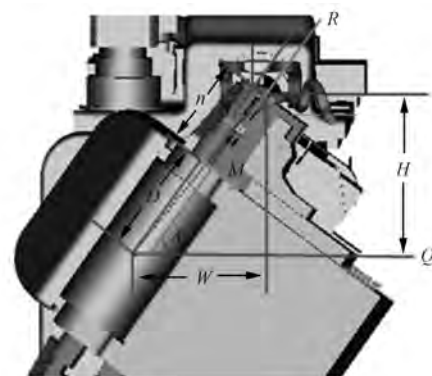


图4 坐标系在机头的对应位置示意图

图3、图4中, n 是弯管所在的模具层中心到模具底部的距离; m 为模具中心线到弯臂中心线的距离,不同的模具 m 、 n 值均不一样; D 为机头

中心到模具底座的距离; H 为管子中心到机头中心的垂直距离; D, H 是机床的参数,是固定值。

2.1 已知模具坐标 M, N 求机床坐标 Q, R

$$L = \sqrt{(D+n)^2 + m^2} \quad (1)$$

$$A_1 = \arcsin(H/L) \quad (2)$$

$$A_2 = \arcsin(m/L) \quad (3)$$

$$A_3 = A_1 + A_2 \quad (4)$$

$$W = H/\tan A_1 \quad (5)$$

右手模(如图4所示):

$$\begin{cases} Q = -W \\ R = 90^\circ - A_3 \end{cases} \quad (6)$$

左手模(如图4所示):

$$\begin{cases} Q = W \\ R = 90^\circ + A_3 \end{cases} \quad (7)$$

2.2 已知机床坐标 Q, R 求模具坐标 M, N

$$L = \sqrt{H^2 + W^2} \quad (8)$$

$$A_3 = 90^\circ - R \quad (9)$$

$$A_1 = \arctan H/W \quad (10)$$

$$A_2 = A_3 - A_1 \quad (11)$$

$$\begin{cases} m = L \cdot \sin A_2 \\ n = m/\tan A_2 - D \end{cases} \quad (12)$$

通过式(1)~式(12)换算,就能够实现机床坐标系与模具坐标系的相互转换。在已知当前弯管时的模层参数时,就能计算出 Q, R 值,使机床移动到夹管位置。同时程序也可通过 Q, R 值来判断出模具的当前位置,避免模具与管件发生碰撞。

3 控制系统方案

弯管机要采集的信号很多,且各轴均是刚性连接,在运行中还需要进行多轴联动,对系统的实时性要求较高。该设备选用倍福公司 EtherCat 总线搭建了伺服控制系统,扫描周期能达到微秒级别,且采用软 PLC 模式^[4]。软 PLC,即以通用操作系统和 PC 为软硬件平台,用软件实现传统硬件 PLC 的控制功能,速度快,开放性比传统硬件 PLC 更高,可充分利用 PC 的 CPU 实现强大的功能,可以完成复杂的较大逻辑运算、闭环控制等功能^[5]。

根据弯管工艺,该设备要控制的轴有 13 个,系统选用倍福 AX5000 系列的驱动器和电机,采

用多圈绝对值编码器以及输入输出模块。操作电脑采用倍福 CP 系统一体化工业电脑,内装 TwinCat2 编程软件。低压电气为施耐德品牌,同时弯管机还具有防皱板润滑、芯棒润滑、夹紧力自动检测等功能,最大限度延长防皱板和芯圈的寿命,另外还配有机器人通信接口及接口程序,可用机器人上料。系统结构图如图 5 所示。

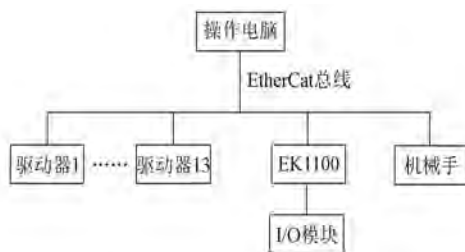


图5 系统结构图

4 软件系统

软件系统分为手动和自动 2 种方式。手动模式能对设备的各个电机进行独立操作,具有点动和单独定位功能;自动模式则能根据上位机生成的工艺点表格自动运行。上位机软件由 VC 高级语言开发,特别针对弯管这种特殊工艺,能以虚拟制造的方式,对数控指令先行仿真运行,遇到干涉情况,可以自动报警,以提示工艺人员及时修改工艺以便加工。上位机和 PLC 采用 ADS 通信协议。该设备开发的操作界面相对于常用的组态软件来说更灵活,同样具有用户登陆、生产操作、数据监控、参数设置、曲线采集、报警提示、数据记录等功能,完全能满足设备运行要求。

5 PLC 控制程序

PLC 控制程序采用的是结构化文本(ST)语言。ST 编程语言类似于 C 语言,因此可利用与个人电脑相同的程序设计技术,进行梯形图所难以执行的复杂计算,特别是模具坐标系和机床坐标系的转换。常用的程序及回路可通过建立功能区块(FB)就可以轻易地被重复利用。图 6 所示为动作流程图。

需要配置的电机参数包括减速比、限位、系统惯量、PID 参数等,并进行测试^[6]。测试电机是否存在抖动、异响及随动误差,在不同速度和加减速下,随动误差越小越好,一般不能超过 0.05 mm,

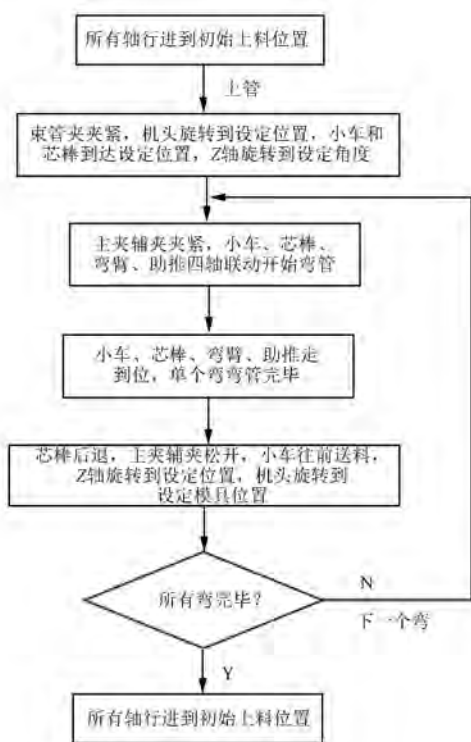


图6 动作流程图

否则多轴联动时会出现电机受力不均的情况^[7]。电机随动误差测试图如图7所示。图7反映电机在不同速度下各个曲线的走势, 曲线1和曲线2为电机设定位置和实际位置, 两者基本重合; 曲线3为随动误差; 曲线4为电机扭矩。横坐标为时间, 纵坐标包括了电机位置、扭矩、随动误差, 其中扭矩用相对于电机最大扭矩的比值表示。从图7可以看出, t_2 时段的位置曲线斜率比较陡, 同时电机扭矩也比前面的大, 代表 t_2 时段的电机速度比 t_1 时段的速度要快, 电机速度越快, 加速度越大, 随动误差值也会跟着变大, 曲线3显示的随动误差在 t_2 时段也有轻微的波动。

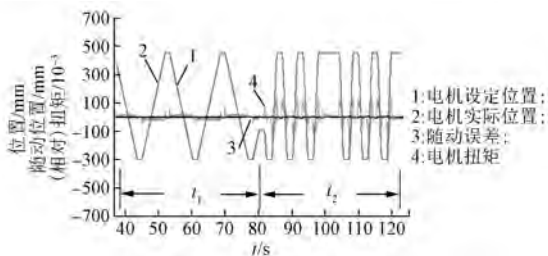


图7 电机随动误差测试图

管型的参数是通过上位机输入, 只要在上位机输入所需侧弯的管子 XYZ 三维坐标, 以及使用

哪一层模具弯管, 上位机系统会自动将其转换成机床坐标下的各个轴位置, 并生成工艺指令表。管形输入窗口如图8所示。

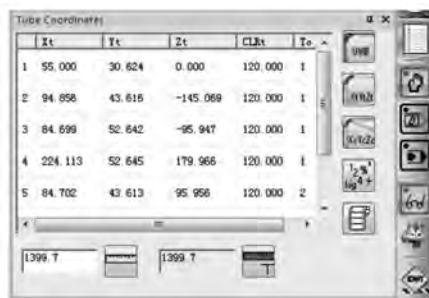


图8 管形输入窗口

图8的三维数据生成的管形图如图9所示。从左到右看, 最左边为最先弯曲的, 最右边为最后弯曲的, 一一对应图8的三维数据。白色代表直管段即图8中 X_1 所对应的长度, 灰色的代表弯管段即 Y_1 所对应的数值。

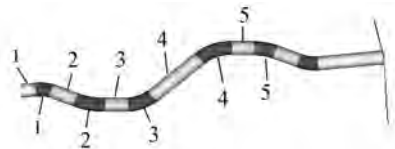


图9 三维坐标生成的管形

PLC 需要读取指令表的位置, 让各个轴按照指令表的位置和速度操作^[8]。然而电机如果采用单轴独立的方式来控制, 各个轴之间的关系就会非常多, 考虑到某些情况下的插补动作, 程序就会变得非常庞大和复杂。

由于弯管加工是一个不可逆的过程, 不需要进行反向动作, 也无需分主从轴, 通过综合考虑, 主控程序中采用先进先出 (FIFO) 这一功能, 大大简化了程序的复杂程度。FIFO 是类似 CNC 的一种多轴联动通道, 可以将多个轴绑定在一块运动。FIFO 通道内有一个预先设置好的缓存表, 通道内轴的个数等于缓存表的列数。当 FIFO 启动时, PLC 就会把指令表的数据往缓存表填充; FIFO 执行时缓存表就根据设定的周期依次向外输出数据, 相应的电机就会按收到的数据执行。当缓存表里的数据少到一定程度时, PLC 就会再次向缓存表里填充数据, 进行循环, 也可以建立多个缓存表循环使用, 直到整个工艺完成。

主要参数的定义如下。

FIFO Dimension (Axis Count): FIFO 组中轴的数量,该设备为 13 个轴。

FIFO Length: 缓存表的行数,根据实际需求来设,最多 1 000 行。

FIFO Override Type: 选择 Override 的切换方式,1 为阶跃型,2 为平滑型。本设备选择 2。

P-T2 Time for Override Changes: Override 从 100% 变为零的时间。该设备为 0.1 s,时间越长,停机越平缓。

Base Time of FIFO Entries: 缓存表输出间隔时间。该设备为 0.002 s,相当于 2 ms 输出一行位置数据。

FIFO 用到的指令如下。

FIFO Group Integrate: 集成独立的 PTP 轴到 FIFO 通道,即在自动弯管时把 13 个轴全部集成到 FIFO 里,此时不允许轴单独运动。

FIFO Group Disintegrate: 将 FIFO 组中的各轴释放为独立的 PTP 轴。PTP 轴为 Point to Point 的缩写,即单轴点对点的运动。在手动或者复位时将轴恢复成独立控制。

FIFO Start: 起动 FIFO 运动,FIFO Table 向外输出数据。

FIFO Write: 向 FIFO Table 填充数据。

FIFO Set Channel Override: 设置 FIFO 通道运动速度的百分比,此时速度不能单独调整,只能通过倍率进行整体调整。

考虑有的弯管工艺比较复杂,程序的步数会比较多,因此配置了 2 个缓存区 Table1 和 Table2,每个 500 行,按照 2 ms 输出一行来算,500 行可以运行 1 s,而在这 1 s 内 Table2 已经将后面 500 行的数据指令填充好,在 Table1 中的指令运行完后再切换到 Table2 运行,然后在 Table2 运行的同时再填充 Table1 的数据,轮流切换直到程序运行完成,最终实现整个弯管工艺。

图 8、图 9 的管型加工时的部分轴的位置曲线如图 10 所示。

图 10 中,曲线 1 为送料小车的位置曲线,可以看出小车位置逐渐变小,说明在弯管过程中不断向前送料。曲线 2 代表主夹位置,夹紧时位置变小,松开时位置变大。曲线 3 为辅夹位置,与主夹的动作一样。曲线 4 代表助推,助推是用来辅

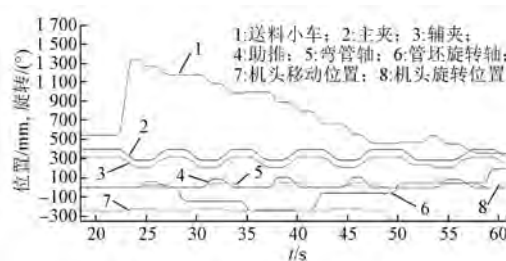


图 10 弯管时各个轴的位置曲线图

助弯管的。曲线 5 是弯管轴的位置曲线。

从图 10 可以看出,2 个轴是同时运动的,且和曲线 1 的送料小车联动,弯管的同时要向前送料,才能保证管子不被拉断。

曲线 6 是管坯旋转轴的位置曲线,用来定位管子 Z 轴坐标,属于弯管前的准备工序,在弯管前必须走到位。可以看出曲线 5 运动时曲线 6 是不动的。

曲线 7 为机头移动位置曲线。曲线 8 为机头旋转位置曲线。两者配合用来控制模腔的位置,在弯管时两者是不动的。

经过实际弯管测试,FIFO 这一功能可以完全满足弯管工艺需求,且电机运行平稳、定位精度高。

6 结 语

制造的侧弯式弯管样机后经测试,具有速度快、精度高、噪声小、耗电量小等优点;还具有夹紧力自动检测功能,大大减少了换模调试的时间。另外根据用户需求可增配焊缝识别、机器人通信接口等功能,且配有可视化三维图形操作界面,操作直观,管形调试和换模调试简单方便,取得了多项国家专利,且通过了浙江省首套产品认证。目前为止已经生产了将近 20 台弯管机,为企业取得了良好的经济效益。

【参考文献】

- [1] 刘文学,赵少鹏,王磊刚.基于 PLC 的大口径油气管材弯管机电液控制系统[J].制造业自动化,2015,37(18): 131.
- [2] 王鹏,李东滨,刘朝阳,等.基于 PLC 与步进电动机的全自动数控弯管机设计[J].电气技术,2010(9): 51.

(下转第 45 页)

全散线模型中内部导体对电场分布的影响可以忽略,电场主要分布在绕组外层导体的包络面与定子铁心槽之间。用于耦合电容计算时,简化散线模型与全散线模型的差别非常小。

4 耦合电容测量对比

由于所研究的电机绕组为 Y 形连接,将电机的 U、V、W 接线端子连接到一起,使用 LCR 电桥对绕组与机座间的耦合电容进行测量,测量值 $C_{WF} = 11.280 \text{ nF}$ 。表 2 所示为耦合电容计算值与测量值误差对比结果。

表 2 耦合电容计算值与测量值误差对比结果

名称	数值/pF	误差/%
解析法	19.741	75.01
全散线模型	12.678	12.39
简化散线模型	12.677	12.38
测量值	11.280	-

由表 2 可以看出,散线模型相比解析法在准确度上有很大提高,而简化散线模型与全散线模型准确度基本一致。

5 结 语

准确计算交流电机定子绕组和定子铁心之间的耦合电容,对于预测 PWM 变频驱动系统共模电流有着重要作用。全绕组散线模型较解析计算,能有效提高计算精度,但建模工作量大。本文在此基础上,提出了一种简化散线建模方法,简化了绕组内部的模型,减小了模型复杂度,且计算准确度与全散线模型相当。对于绕组槽内导线较多的电机的耦合电容计算,经计算和测量结果对比,证明该方法简单有效。

【参考文献】

- [1] RAN L, GOKANI S, CLARE J. Conducted electromagnetic emission in induction motor drive systems. I. time domain analysis and identification of dominant modes[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1998, 13(4): 757.
- [2] SKIBINSKI G L, KERKMAN R J, SCHLEGEL D. EMI emissions of modern PWM AC drives[J]. IEEE Industry Applications Magazine, 1999, 5(6): 47.
- [3] 马伟明. 电力电子系统的电磁兼容[M]. 武汉: 武汉水利电力大学出版社, 2000.
- [4] 幸善成, 吴正国. 逆变器驱动电机系统环路型电机轴承电流的研究[J]. 海军工程大学学报, 2006, 18(2): 64.
- [5] 刘欣, 孙力, 孙亚秀. PWM 驱动系统中感应电动机轴电压轴电流研究[J]. 微电机, 2007, 40(9): 5.
- [6] 张志强, 冀路明, 庄亚平, 等. 船用变频调速装置传导干扰的抑制对策[J]. 电机与控制应用, 2010, 37(6): 59.
- [7] MUETZE A, BINDER A. Calculation of motor capacitances for prediction of the voltage across the bearings in machines of inverter-based drive systems[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2007, 43(3): 665.
- [8] 刘瑞芳, 陈嘉垚, 马喜平, 等. 基于 PWM 逆变器供电轴电流问题的交流电机耦合电容的计算与测量[J]. 电工技术学报, 2014, 29(1): 60.
- [9] 刘瑞芳, 李俊峰, 桑秉谦, 等. 基于电磁场数值计算的变频供电感应电机耦合电容与轴电压的分析[J]. 电工技术学报, 2015, 30(14): 161.
- [10] MA X, LIU R, ZHENG B. Analysis and calculation of capacitance parameters in induction machines to predict shaft voltage[C] // Proceeding of International Conference on Electrical Machines and Systems, 2012.

收稿日期: 2019-06-12

(上接第 40 页)

- [3] 谭宝成, 张海东. 大口径弯管机控制系统建模与实现[J]. 西安工业大学学报, 2014, 34(2): 167.
- [4] 谢香林. EtherCAT 网络及其伺服运动控制系统研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2008.
- [5] 鞠波. 基于倍福伺服系统的正弦振动试验装置设计[J]. 四川兵工学报, 2013(11): 109.
- [6] 李亚忠, 翟庆余, 周健. 弯管机自动速度的跟随与曲

线设定[J]. 锻压装备与制造技术, 2015, 50(2): 32.

- [7] 张守娟. 随动系统的多电机同步控制方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- [8] 李克彬, 王淑琴, 林伟明. 三维数控弯管机的研究与开发[J]. 轻工机械, 2008(3): 33.

收稿日期: 2019-06-18