

自动钻铆系统中工业机器人协同控制技术研究*

Research on Industrial Robot Cooperative Control Technology for Automatic Drilling and Riveting System

中航工业北京航空制造工程研究所 张 杨 高明辉 周万勇 刘建东

[摘要] 针对一种用于壁板类部件的机器人自动钻铆系统,对工业机器人协同运动控制技术进行了研究,提出了用于工业机器人协同的控制方法,并给出了关键技术的实现方式。此项研究的技术方法也可扩展应用于基于工业机器人平台的多种自动化柔性装配系统。

关键词: 自动钻铆 工业机器人 协同控制技术

[ABSTRACT] Aimed at a robot automatic drilling and riveting system used for panel component of aircraft, the control technology of industrial robot cooperative motion are researched, a method for industrial robot cooperation is proposed and the achievement of key technology is given. The control method can be applied to many automatic flexible assembly system based on industrial robot platform.

Keywords: Automatic drilling and riveting Industrial robot Cooperative control technology

随着现代飞机设计的发展,飞机装配也向数字化、柔性化、自动化和集成化方向发展^[1]。自动钻铆系统作为自动化、数字化的铆接装配设备,在国外已经应用比较广泛。自动钻铆系统不仅能提高装配效率,更主要的是能够确保制孔和安装质量,大大减少人为因素造成的缺陷,成为改善飞机性能的重要方法之一^[2]。目前,国外对于自动钻铆技术的研究正在向包含工业机器人、专用柔性工装、全自动铆接机和坐标测量机的柔性自动化装配系统方向发展^[3]。机器人自动钻铆系统作为一种高柔性、低成本的自动化装备,能够完成对飞机部件的钻铆加工而无需移动工件,相比传统的自动钻铆加工方式在加工精度和效率上都有所提高。

机器人自动钻铆系统由双机器人协同实现自动化的制孔和铆接,其中,工业机器人的协同运动控制、自动定位和系统集成控制是基于机器人平台的自动钻铆系统的关键技术。本文提出一套用于工业机器人协同定位运动的控制方法,并给出了关键技术的实现方式,此

项研究技术也可扩展应用于基于机器人平台的多种自动化柔性装配系统。

1 机器人自动钻铆系统构成

针对机身壁板类部件研制的机器人自动钻铆系统结构如图1所示。

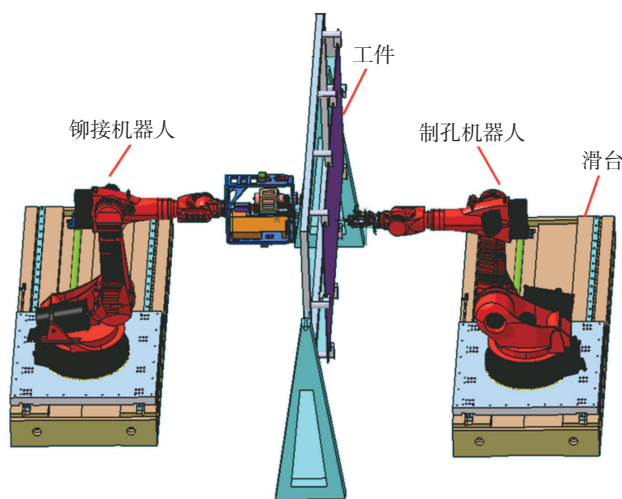


图1 机器人自动钻铆系统构成

Fig.1 Structure of robot automatic drilling and riveting system

系统由工业机器人、末端执行器和水平滑台3部分构成。机器人为六轴串联机器人,水平方向可沿滑台进行滑动,以覆盖整个部件工作空间。两台机器人末端分别安装制孔执行器和铆接执行器。制孔和送钉由一台机器人完成,铆接由双机器人协同完成。

机器人自动钻铆系统控制系统构成如图2所示。

机器人型号为 KUKA KR360L240,机器人通过工业以太网与控制计算机连接。两台机器人之间通过同步电缆连接,通过 Profibus 现场总线与外围 PLC 及 I/O 通信。

2 机器人协同方式

机器人协同是指两个或者多个机器人之间同步的连续轨迹运动,同时机器人之间具有坐标耦合关系。本系统中 KUKA 机器人配置了 Roboteam 协同软件工艺包

* 国家科技支撑计划项目(2011BAF13B06)、装备预先研究项目(51318050206)资助。

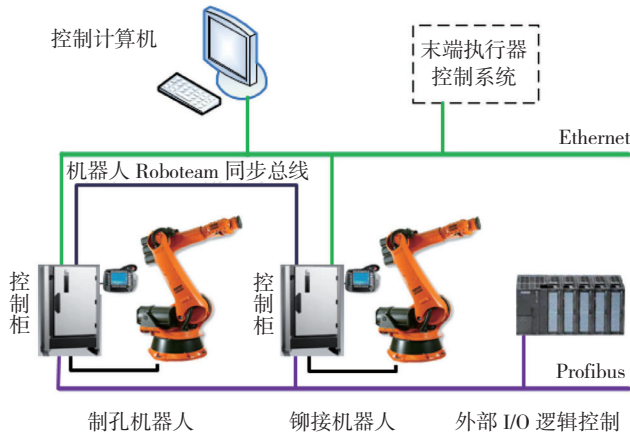
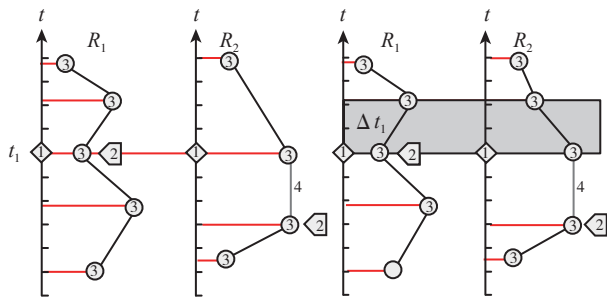


图2 控制系统结构

Fig.2 Structure of control system

及相应的硬件,但需要针对钻铆系统需求研究相应的控制方法,并实现系统的自动化集成控制。

KUKA 机器人的协同方式有两种模式,运动起始点同步和运动时间同步(图3)。



(a) 起始点同步方式原理 (b) 运动时间同步方式原理

(1 为同步点;2 为同步指令;3 为路径点;4 为等待)

图3 协同控制方式比较

Fig.3 Comparison of cooperative control method

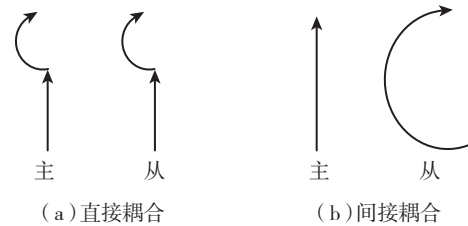
(1) 运动起始点同步方式。协同机器人在同步点开始同步,同步后各自继续执行运动程序,机器人之间没有耦合关系。

(2) 运动时间同步方式。协同机器人在同步点开始同步,同时机器人运动耦合机器人之间协调运动速度,保证在 Δt_1 同步周期内同时到达下一个路径点。

针对机器人钻铆系统需求,综合考虑钻铆系统作业可靠性、工作效率、离线编程软件程序规划等因素,采用运动时间同步方式可达到更好的作业效果,但控制方式上比起始点同步方式复杂。

3 机器人协同耦合方式

要实现机器人的协同运动,关键是建立机器人之间的几何耦合关系。几何耦合方式分为直接耦合和间接耦合方式(图4)。



(a) 直接耦合 (b) 间接耦合

图4 直接耦合和间接耦合运动方式原理图

Fig.4 Principle of motion with direct coupling and indirect coupling

(1) 直接耦合方式:从机器人直接跟随主机器人运动,两个机器人执行相同的轨迹运动,从机器人不需要单独的控制指令。

(2) 间接耦合方式:从机器人不直接跟随主机器人运动,执行一个同步的叠加轨迹运动,从机器人执行过程独立的运动程序。

由于被加工工件具有一定的曲率,在完成铆接的过程中需要两个机器人以“镜像”的方式配合完成,即机器人末端刀尖位置相同而姿态不同,机器人要各自完成不同的运动过程,因此,采用间接耦合方式进行协同运动。

4 机器人协同运动坐标系

在机器人钻铆系统中,包含全局坐标系(\$WORLD),工件坐标系(\$BASE0),机器人基坐标系(\$BASE1、\$BASE2),机器人末端坐标系(\$TOOL1、\$TOOL2)等多个坐标系,此外,还有滑轨坐标系和激光跟踪仪坐标系(图5)。

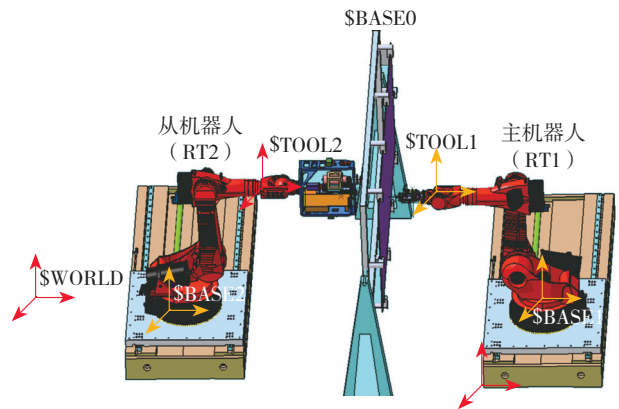


图5 机器人钻铆系统坐标系

Fig.5 Coordinate of robot automatic drilling and riveting system

要保证机器人的空间定位和协同运动的精度,关键是要准确建立各个坐标系并找出坐标系间的转换关系。系统中坐标系的建立由激光跟踪仪测量拟合得出,采用数值方式输入至机器人控制系统。

机器人钻铆系统坐标系作用及建立方法如下:

(1) 全局坐标系。

全局坐标系作为其他坐标系的基准,各个测量点都统一在全局坐标系下,可以减少坐标变换和拟合带来的误差。全局坐标系根据布置于现场的固定测量点建立,固定测量点经过标定以保证全局坐标系的准确。

(2) 机器人基坐标系。

在机器人协同系统中,机器人的基坐标系用于建立两台机器人的相对位置关系,机器人的相对位置关系直接影响了机器人协同运动的同步性和一致性。

机器人底座安装于滑台上,由于实际机械制造装配、零件变形、机器人站位变化及地基变化等影响,两台机器人在导轨上不同位置的相对坐标关系是不同的。针对部件需求及机器人工作行程范围,将机器人在导轨位置划分为3个站位,在每个站位处建立一组机器人的相对坐标关系。机器人在每个站位完成一个区域的制孔铆接作业,3个站位即可覆盖整个工件作业区域,如图6所示。

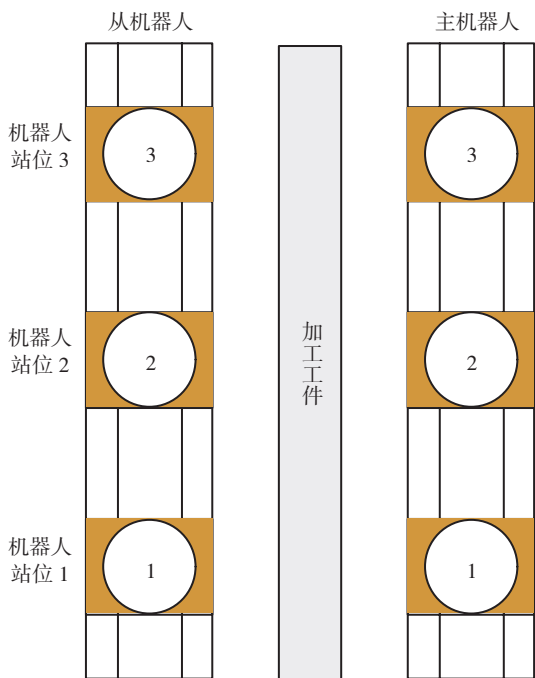


图6 机器人站位分配示意图
Fig.6 Principle of robot station assignment

为保证机器人站位的位置重复精度,在机器人滑轨面安装光栅尺进行闭环控制,同时采用双电机消除方式提高机器人滑台定位精度,减少坐标系重复标定造成的效率低下。机器人基坐标系建立采用机器人旋转坐标轴结合固定测量点测量的方式进行建立。

(3) 滑轨坐标系。

滑轨坐标系可给出两侧滑轨及底座的相对位置关系。为保证两台机器人在同一站位处的对称性,使机器

人在协同过程中行程范围和机器人位姿都接近各自的理论值,要保证两侧滑轨安装的一致性。实际安装过程中,要保证双侧滑轨位置、光栅尺安装位置和导轨方向偏差在一个较小的误差范围内,并根据实际测量点得出坐标系变换关系,用于离线编程软件规划及仿真分析。

(4) 末端坐标系。

末端坐标系用于确定机器人基坐标系与末端执行器刀尖点的坐标转换关系。末端坐标系的建立是根据末端执行器上布置的固定测量点拟合得出。固定测量点的位置在末端执行器安装前进行标定,用于末端执行器坐标系的拟合。

(5) 工件坐标系。

工件坐标系用于确定实际工件的空间位置关系。由于部件制造误差和安装定位误差的存在,需要根据实测值建立工件坐标系,得出部件和自动钻铆系统间的实际坐标关系,输入到离线编程和仿真系统,以实现离线编程点位、法矢到机器人刀位点的准确变换。如果采用的是数控柔性工装,可直接通过数据接口读取柔性工装系统存储的工件坐标系,并根据相对关系进行部件调整,可实现两个系统的集成控制。

5 自动钻铆系统中机器人控制要点

自动钻铆系统中机器人控制要点如下:

(1) 双机器人镜像工作。

在机器人钻铆系统中,工件的制孔由单台机器人完成,而铆接需要两台机器人协同完成,即,制孔机器人末端进行送钉和顶铆,铆接机器人末端进行铆接。针对具有曲率的工件,需采用两台机器人镜像的工作方式,沿工件法线方向完成铆接。实现方式如图7所示。

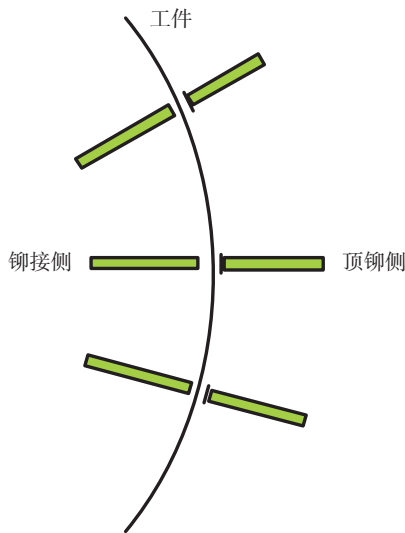


图7 机器人铆接工作模式示意图
Fig.7 Principle of robot riveting work mode

(2) 协同效率优化。

在设计自动钻铆系统中,钻孔机器人设为主机器人,完成加工工件的制孔、送钉和顶铆;铆接机器人设为从机器人,完成铆钉的铆接。为了提高自动化加工作业效率,满足产品应用需求,需要对钻铆系统的各个环节进行优化。从机器人协同工作方面分析,一个工作循环中机器人运动设计如图 8 所示。

(3) 运动规划。

机器人运动规划主要目的是保证机器人在工件制孔过程中以较短路径、较短时间和最优姿态运动,在运动过程中要避免障碍、防止发生干涉,同时,要满足机器人精度补偿对运动范围的需求。规划设计如下:

- 制孔区域分块。机器人在每个站位可以覆盖一定范围的制孔区域,同时,将一个站位的制孔区域按照孔类型和方位划分为多个小块区域,每个小块区域根据基准孔进行理论孔位的修正。经过区域分块后,机器人的一次制孔作业就集中于一个小块区域,有利于机器人的分区域精度补偿,并使机器人单次在较小的范围内运动,提高加工效率。

- 添加运动辅助点。添加辅助点的主要目的是使机器人在两个制孔点之间运动时避让障碍,使机器人以规划的运动轨迹运动。制孔作业前通过离线仿真软件进行仿真验证检查干涉,排除问题后再由机器人控制系统执行运动,提高系统的安全性。实际编程中两点之间一般采用直线运动方式,以保证机器人按照预期轨迹和姿态进行运动。

- 运动参数规划。在小块区域制孔过程中,由于孔间距较小,机器人每次移动距离很短,规划时使机器人以较低的速度和加速度运动,以减小频繁启停对系统的冲击。当机器人在制孔区域之间移动或者站位转换等大范围移动时,规划较大的速度和加速度,节省运动时间。

(4) 机器人同步过程规划。机器人同步的基本过程规划如图 9 所示。

机器人进行初始化后,主、从机器人分别回 HOME 点(HOME 点位置根据实际情况设置),主、从机器人都到达同步点后,同步开始。这时,从机器人执行一条几何耦合指令,完成耦合。由 SYNC 命令设置需要协同的程序段后,双机器人开始执行协同运动。当所有运动完成后,解除同步和耦合关系,主、从机器人各自回到 HOME 点。

(5) 协同控制软件。

机器人系统通过工业以太网与集成控制计算机连接,二者之间的通讯方式为面向工业控制的标准 OPC

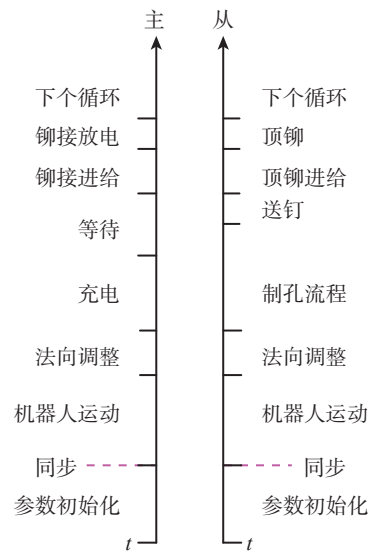


图8 机器人协同工作循环

Fig.8 Cycle of robot cooperative working

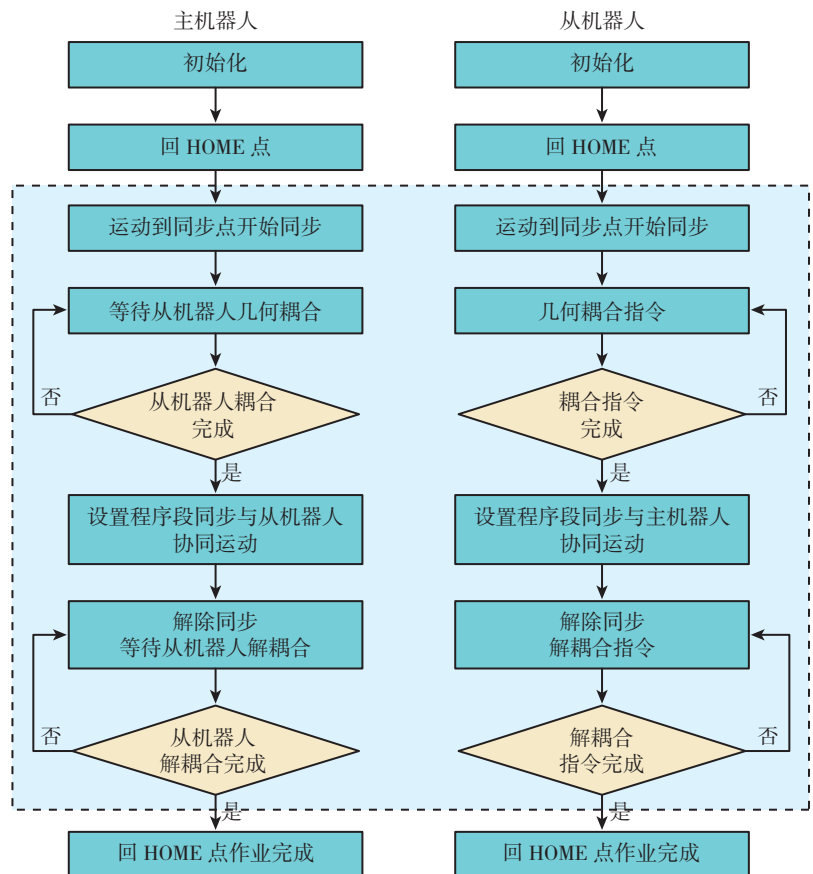


图9 机器人同步过程

Fig.9 Process of robot synchronizing

(下转第 94 页)

避免厂房其他设备的固有频率,避免共振。

综上所述,各项计算结果符合通常的规律,计算结果可信。应力计算结果表明数控定位器的材料和结构尺寸合理,满足使用要求。位移计算结果可为定位器的运动控制提供必要的基础数据。

3 强度分析

数控定位器主要承受压缩载荷,因此,所有的螺栓连接不会存在问题。

对 Z 向滚珠丝杠和接头组件进行强度分析,选取载荷最大的情况 50000N 进行工程分析。滚珠丝杠最弱处剖面为 $R=22.5$ 的实心圆,因此,此剖面的应力为:

$$\sigma = \frac{F_z}{\pi \times 22.5^2} = 31.5\text{MPa} \quad (1)$$

由于滚珠丝杠沿轴向在两侧位置有侧向支持,不存在稳定性问题。而其应力远小于材料的压缩屈服应力,因此,滚珠丝杠满足设计要求。

接头组件的中心轴剖面为 $R=20$ 的圆形,其最大应力为:

$$\sigma = \frac{F_z}{\pi \times 20^2} = 39.8\text{MPa} \quad (2)$$

同样,由于接头组件自由部分较短,不会失稳,而其应力远小于材料的压缩屈服应力,因此,其设计满足要求。

综合有限元分析结果及工程分析结果可知:定位器所有部位的应力远小于材料的屈服应力,因此结构的强度满足要求。

4 结论

(1)由计算结果可知,各项计算结果符合通常的规律,表明计算结果可信。数控定位器的最大等效应力均小于屈服强度,表明选用的材料和结构尺寸合理,可以满足使用要求。

(2)数控定位器的位移结果,表明数控定位器的刚性很强,可为数控定位器的运动控制提供必要的基础数据。

(3)有限元计算结果,指导数控定位器结构设计。可根据有限元分析结果,在满足使用强度和刚度的前提下,改变数控定位器的床身底座、滑枕、箱体等零件的材料或壁厚,或优化设计零件的结构形式,达到节省材料,节约成本,快速制造等目的。

(4)模态分析得出数控定位器的自身固有频率,在设计阶段,可通过改变定位器的结构来避免厂房其他设备的固有频率,避免共振。

(5)根据材料力学分析数控定位器的 Z 向滚珠丝

杠和结构组件的结果,表明定位器所有部位的应力远小于材料的屈服应力,因此结构的强度满足要求。

参考文献

- [1] 许国康. 飞机大部件数字化对接技术. 航空制造技术, 2009(24):42-45.
- [2] 邹方,张书生. 飞机总装自动化校准对接系统. 航空制造技术, 2008(7):34-36.
- [3] 蒋君侠,陈琪,方强,等. 三坐标定位器系统动态特性分析和实验. 计算机集成制造系统, 2012(11):2471.

(责编 日午 亿霖)

(上接第 90 页)

协议。集成控制软件解析离线编程程序,向两台机器人发送控制指令,机器人控制程序解析接收到的指令,控制双机器人协同运动。图 10 所示为用于机器人协同控制的软件界面。

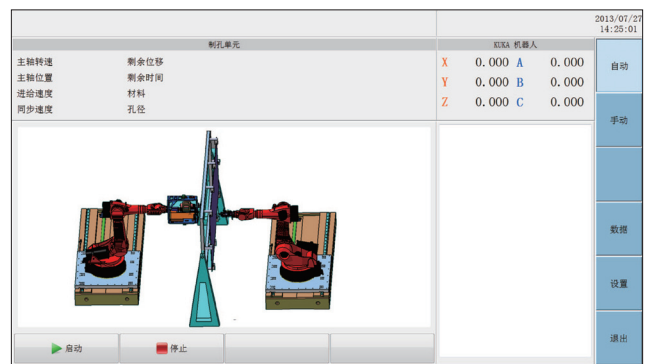


图10 机器人协同控制软件界面

Fig.10 Interface of robot cooperative control

6 结束语

本文针对机器人自动钻铆系统特点,研究了工业机器人协同控制技术,论述了机器人协同运动方式、协同耦合方式、协同坐标系和协同控制要点,其中的控制方法也可适用于多种飞机装配设备中的工业机器人控制。在实际应用过程中,机器人的控制还要考虑末端执行器控制系统的配合、机器人定位精度补偿和离线编程与仿真软件规划等问题,突破这些关键技术后,机器人技术在飞机装配上将会有更多更好的应用。

参考文献

- [1] 王珉,陈文亮,郝鹏飞. 飞机数字化自动钻铆系统及其关键技术. 航空制造技术, 2013(Z1):80-83.
- [2] 楼阿莉. 国内外自动钻铆技术的发展现状及应用. 航空制造技术, 2005(6):50-52.
- [3] 李菡,余德忠. 一种基于双机器人的自动钻铆终端器设计. 机械科学与技术, 2010(10):1297-1301.

(责编 日午 亦非)