

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2014.02.010

基于多样性的汽车线控转向容错研究*

邓艳宁¹, 金宇航²

(1. 宁波工程学院 机械工程学院, 浙江 宁波 315016; 2. 浙江联宜电机股份有限公司, 浙江 东阳 322118)

摘要:为解决线控转向系统转向失效问题,将多样性容错技术应用到汽车线控转向系统中。开展了多样性汽车线控转向系统稳定性分析,建立了线控转向机构与其备份机构之间的关系,提出了基于多样性的转向系统容错设计方法;选用不用经验的驾驶员,在驾驶模拟器上对新设计的线控转向系统进行了转向稳定性试验。研究表明,基于多样性容错设计,通过备份的转向功能,驾驶员能根据自己的意图通过转向机构灵活地控制车辆,减少转向失效;同时,能避免由于线控转向系统中过度冗余造成的成本和体积的增加,有利于提高车辆转向稳定性,有利于在汽车线控转向系统中的应用。

关键词: 汽车; 线控转向; 容错; 多样性

中图分类号: TH122; U463.82 **文献标志码:** A

文章编号: 1001-4551(2014)02-0177-05

Fault-tolerant automobile steering based on diversity of steer-by-wire

DENG Yan-ning¹, JIN Yu-hang²

(1. School of Mechanical Engineering, Ningbo University of Technology, Ningbo 315016, China;

2. Zhejiang Linix Motor Co., Ltd., Dongyang 322118, China)

Abstract: In order to solve the problems of steer-by-wire (SBW) system failures, the diversity fault-tolerant technology was applied to the SBW system. The fault-tolerant automobile steering based on diversity of SBW was investigated. After the analysis of the stability of the diversity of steer-by-wire, the relationship between the SBW mechanism and backup mechanisms was established. A method was presented to the fault-tolerant design based on diversity of SBW. A test participant was chosen who has no special skill excepts for over 10 years driving experience. On the driving simulator, the stability of SBW which was designed newly was tested. The experimental results show that the driver can maneuver the vehicle with the steering wheel during the SBW failures. Both cost and volume increase by excessive redundancy within SBW is avoided by the diversified design, thus facilitating SBW application on new-generation vehicles.

Key words: automobile; steer-by-wire (SBW); fault-tolerant; diversification

0 引 言

没有机械联动装置的线控制转向系统能够改善汽车的主动和被动安全性。考虑到汽车的被动安全性,在汽车前端发生碰撞时,机械联动装置能使驾驶员受到的碰撞机会减少,而对于车辆的主动安全性,则需要通过电子控制来改善车辆的稳定性和转向轻便性^[1]。

线控制转向系统失效会导致驾驶操控的不安全

状况。在飞机上,电传操纵系统中的过度冗余能有效避免操纵失效危险。对于汽车,由于成本、体积和重量的增加,不可能在车辆上安装有足够冗余的线控转向系统。

电子稳定控制是通过制动力控制提高车辆的稳定性。目前,许多车辆已经装备有电子稳定控制系统,它是一种能改善车辆稳定性的装置。随着汽车技术的不断提高,电子稳定控制装置将是汽车必备的装置之一。许多车辆上装有驱动转矩分配装置,它通过驱动转矩来增强车辆的稳定性。如今汽车已经通过

收稿日期: 2013-10-15

基金项目: 浙江省自然科学基金资助项目(Y1100173);浙江省教育厅2010年度科研资助项目(Y201016099)

作者简介: 邓艳宁(1977-),女,湖南郴州人,讲师,主要从事汽车电子控制技术方面的研究。E-mail: dyn@nbut.cn

制动力和驱动力矩独立控制车辆,这些装置假定在正常驾驶没有转向系统失效情况^[2]。

本研究提出具有 ESC, DTD 和 SBW 的容错系统来处理线控转向系统。该容错系统通过驾驶模拟实验用来评价线控转向失效下的综合系统的性能。基于多样性的汽车线控转向容错能有效改善汽车转向性能,能避免由于线控转向系统中过度冗余造成的成本和体积的增加,有较强的应用价值。

1 线控转向系统的基本结构

基本的线控转向系统结构如图 1 所示。包括:转向轮角传感器;阻力矩装置;转向传动机构;前轮角传感器;电子控制器(ECUs);以及一些传统传感器,用于监控车速、侧向加速度和角速度。

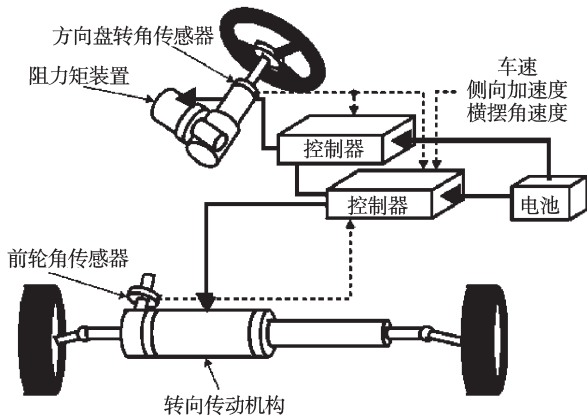


图 1 线控转向系统结构图

1.1 转向装置

典型线控转向装置如图 1 所示,包括一个滚珠丝杠和一个电机,其他类型的转向装置包括带有减速齿轮的齿轮齿条机构和电机。滚珠丝杠型转向装置具有摩擦小、间隙小和刚度高而表现出更准确、快速的响应^[3]。

1.2 阻力矩装置

阻力矩装置包括带有减速齿轮的转向轴和电机,与传统的动力转向相比,线控转向系统的这一部分重量轻并且体积小,有利于舒适性和灵活性设计。

1.3 基本控制

基本控制框图如图 2 所示。前轮参考角 $\delta^* = k_s(V)\delta_h$ 是由转向轮角 δ_h 和车辆速度 V 确定的,虚拟传动比不需要机械元素实现,参考阻力矩 T_r^* 由转向轮角 δ_h 和车辆速度 V 确定的^[4]。

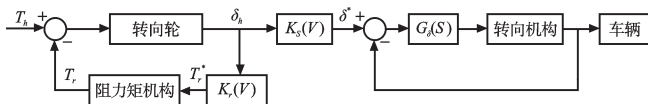


图 2 线控转向系统基本控制框图

灵活性参考信号 δ^* 和 T_r^* 是线控转向系统的一个优点。

2 转向机构失效

转向机构的失效会造成转向功能的丧失,线控转向机构的状态转换图如图 3 所示。符号 A 代表正常状态。当转向机构在 A 状态失效时,线控转向系统丧失转向功能并转换到状态 B,这种状态驾驶员不能转动车辆。对于转向机构失效,线控转向系统结构是非容错的。

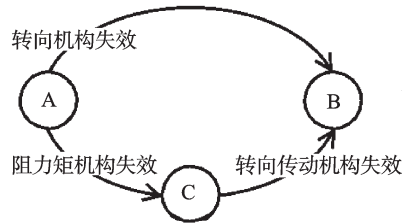


图 3 线控转向系统状态转换图

阻扭矩执行机构在状态 A 处的失效会造成线控制转向系统转换到 C 状态,该状态驾驶员能无阻力地转动车辆。状态 C 没有状态 B 严重。

因此,要解决以上问题,必须加强线控转向系统的容错能力,线控转向系统在部件失效情况下,在降级模式下应该能够保持转向能力。而容错的冗余系统是处理部件失效的一种途径^[5]。

3 线控转向结构的冗余和多样性

3.1 机械备份

当转向执行机构失效时,本研究在转向轮和转向执行机构之间建立一个机械联接。

机械电缆线的备份设计如图 4 所示,转向轮轴和转向执行机构能通过图 4 中的机械联动装置来联接,机械联动装置包括电缆、滑轮和离合器。在转向失效时,离合器通过滑轮轴连接转向轮轴,并把驾驶员施加的转向力通过机械联动装置的电缆传递给转向轮,

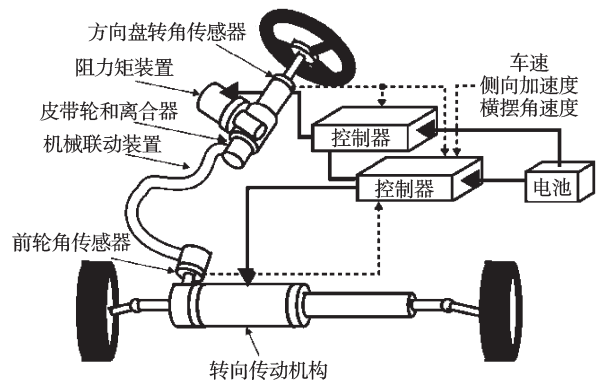


图 4 机械电缆线的备份设计

实现转向功能。

阻力扭矩执行机构可以用来辅助转向力,它类似传统的电动助力转向。驾驶员可以通过转向轮的微小振动等触觉信号获知转向执行机构的失效。控制器通过比较输出的前轮转角和输入的电机电流来检测转向执行机构的失效。

3.2 电机备份

该结构有两个多余的电机和ECU,电机的备份设计如图5所示。在主电机失效的情况下,前轮转角传感器将转向失效的信号传递给备用电机。这样,线控转向系统可以通过备用电机进行工作。

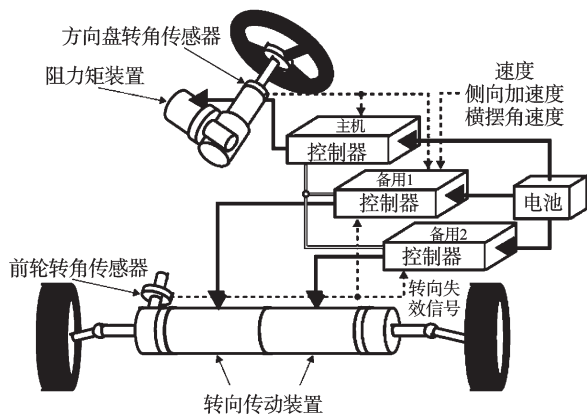


图5 电机的备份设计

3.3 机械电缆和电机多样性备份

为了应对多重失效,必须考虑基于多样性的线控结构。带有机械和电子冗余性的系统结构如图6所示^[6]。结构的状态转换图如图7所示。当两个转向执行机构由于共同的原因造成了状态A到E或从状态C到F而同时失效,线控制转向系统在状态E或F处仍能维持转向功能,此处,驾驶员可以通过电缆线控制转动车辆。

3.4 线控转向外系统备份

一个能减少线控转向系统的失效的可行方法是通过高冗余度和多样性来解决,但是这种方法相对图

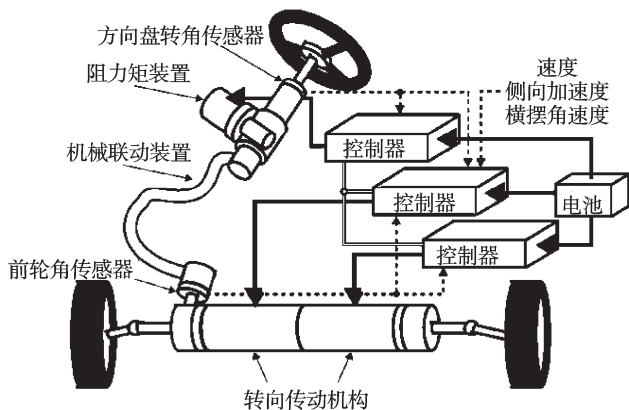


图6 机械电缆和电机多样性备份

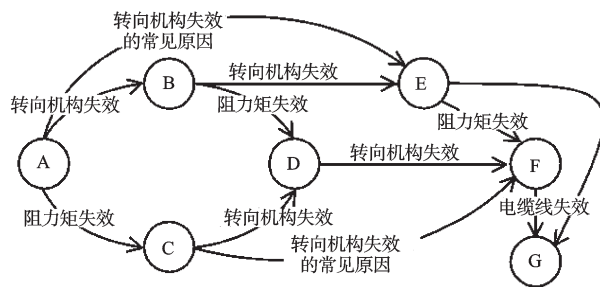


图7 多样性备份的状态转换

6的线控制转向系统会增加费用、重量和体积。而对于车载线控转向备份系统,有必要进一步增加转向稳定性,同时要避免由于多过冗余造成费用增加^[7]。

4 横摆力矩管理

本研究提出一个基于横摆力矩管理的带有SBW、ESC和DTD的容错转向构架^[7],综合控制框图如图8所示。该构架称为横摆—力矩综合控制。这里转向轮作为一个部件,它不仅能操纵前轮,而且也能通过ESC和DTD来管理车辆横摆力矩。

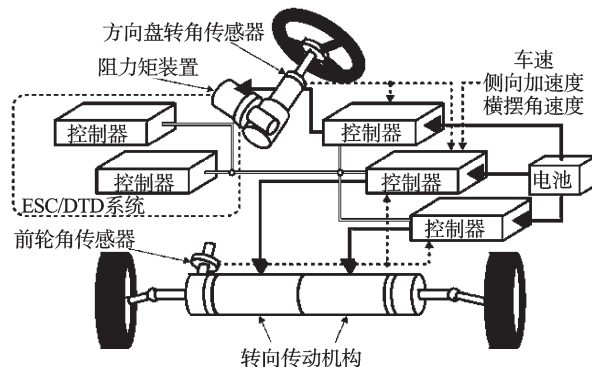


图8 综合控制框图

这种综合构架有减缓转向执行机构失效的作用。也就是说,对于转向执行机构的可靠性具有集成减缓作用。这种转向执行机构的双冗余变得更为实用,因为第3备份由ESC和DTD来提供^[8]。

4.1 操作过程

转向失效开始起综合控制状态转换如图9所示。

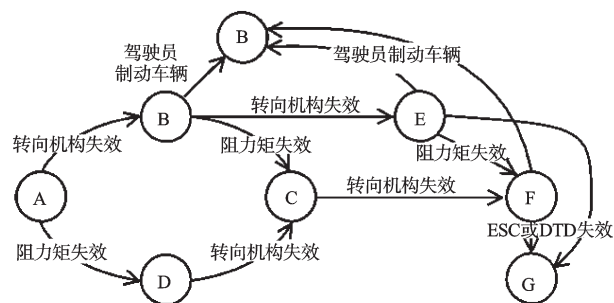


图9 转向失效开始起综合控制状态转换

在相应功能失效后,ESC或DTD在ABCD状态开始失效,可通过停止车辆来处理。这些转换状态在简化图中没有标示出来。在状态E或F处的失效会造成其向状态G的转换。

状态A是正常状态,异常事件被持续监控。当主转向执行器失效时,备用执行器系统没有任何延迟从A状态转换为B状态。出于安全考虑,要求驾驶员停下车辆来确认主执行器失效。

当驾驶员自动停止车辆后,会出现从B状态到状态B的转换。当备份转向执行机构在B状态失效时,状态E会出现。在状态E,驾驶员能够通过使用综合控制来自主地操纵和停止车辆。

有些驾驶员在状态E中继续驾驶车辆。当阻力矩执行器失效时,会转换到F状态。

当ESC和DTD失效时,会出现转向功能的丧失。

4.2 驾驶员操控的优先权

在车辆稳定性控制过程中,主动制动降低了车辆速度。而且,在真实的驾驶情况下,驾驶员的判断和操控应该具有优先性^[9]。例如,考虑到前障碍物避让的情况如图10所示。

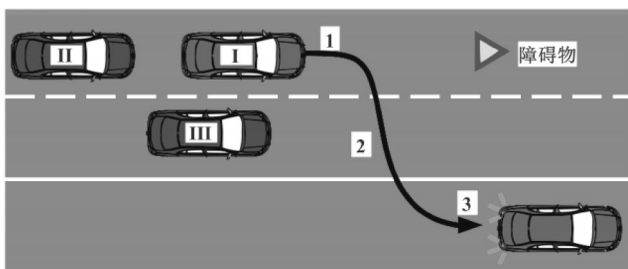


图10 前障碍物避让情况图

在平直的高速公路上主车周围有两辆车辆,一辆为II,而另外一辆为III。

假设主车驾驶员在如图9所示的状态E或F发现了前方障碍物。驾驶员避让障碍物并且通过如下操控与随后而来的车辆II发生追尾碰撞:

- (1) 加速到某一比右边的车辆III要高的车速;
- (2) 在车辆III前面的车道变换;
- (3) 在车辆I在最右边的车道停止。

因为车辆必须加速,在车道变换过程中系统必须通过DTD获得横摆力矩。这种控制模式安装的算法如图11所示。

在正常状态下,ESC和DTD都不被操纵。车辆的横摆角速度完全靠转向执行机构来控制(I),当主备用转向执行机构失效时(II),驾驶员目的是检测(III)。在加速情况下,为了加速,横摆力矩通过DTD来控制(IV)。相反,ESC被激活(V)。

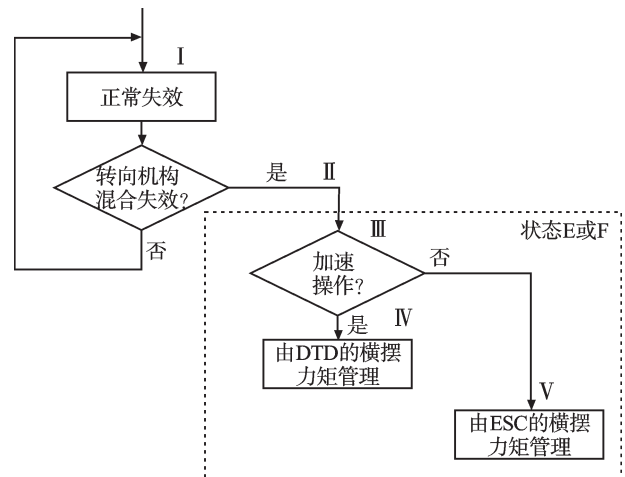


图11 可行的控制模式

5 车辆动态模拟

基于多样性的汽车线控转向容错构架可以通过驾驶模拟器来验证。参与测试的是一位具有10多年驾驶经验的中年人。

5.1 驾驶模拟器

驾驶模拟器是用来对驾驶员—车辆闭环系统进行模拟测试的。驾驶舱运动通过六轴执行器来模拟。视觉信息通过显示屏提供给驾驶员。车辆的行为由类似的四轮车辆模型来计算^[10]。

5.2 驾驶任务

在前障碍避让情况下,驾驶员的操控如图10所示。当车辆I在平直的高速公路上行驶时,转向执行机构出现同步失效。测试者要求通过在最右边的车道上变换车道来停止车辆来避让前障碍和后车II和III的追尾。在危险情况下,这种操控是唯一可行的避免事故的方法。测试者不知道线控转向失效的时间也不知道障碍物出现的时间。车辆速度为30.2 m/s,并且处于状态E处。要模拟的问题是综合控制是否能使驾驶员通过使用转向车轮、加速踏板和制动踏板来执行安全指令。

5.3 模拟结果

与加速踏板活塞、制动踏板活塞、转向轮角、纵向力、横摆角度、车辆速度、侧向位移和报警信号相关的时间序列如图12所示。

首先,驾驶员操纵加速踏板的目的是超车到车辆III的右方;其次,通过操纵转向轮来变换车道;结果,通过DTD来获得横摆角速度并且完成超车。在获得足够的横摆角速度后,驾驶员回正转向轮使车辆直行,制动踏板用于停止车辆。通过ESC横摆角速度减少。车辆能安全停车。

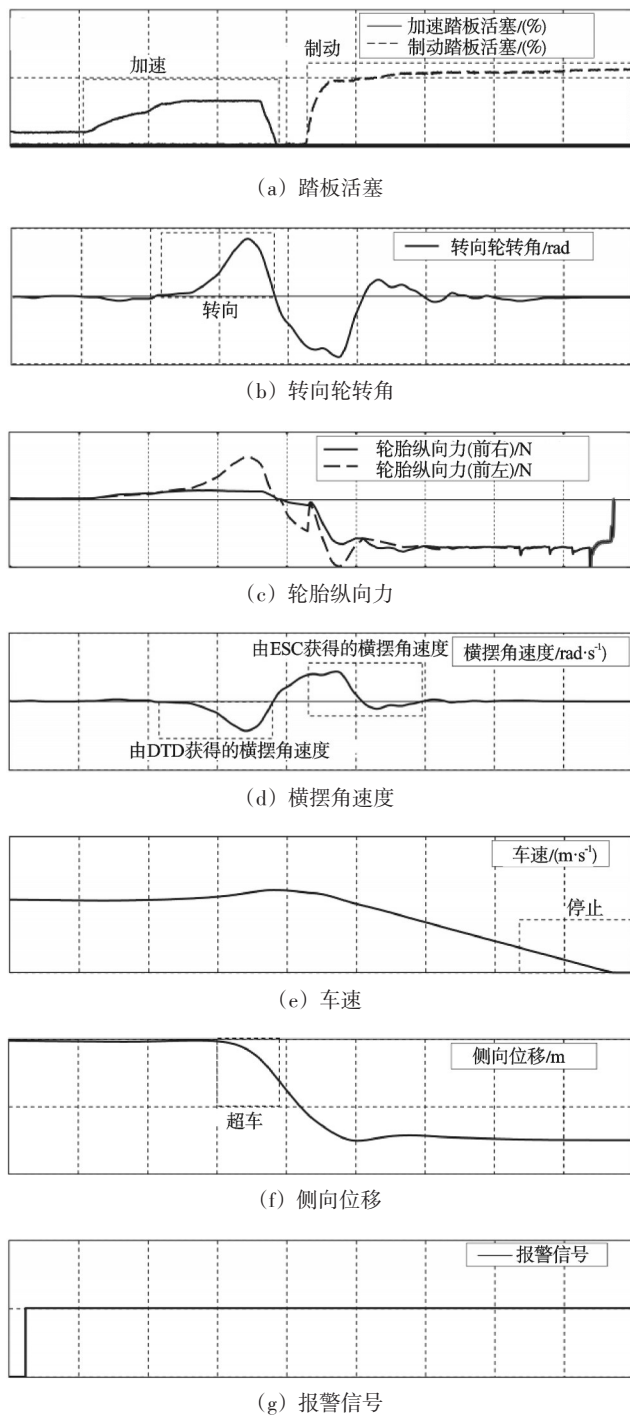


图12 模拟试验结果

图12显示的结果是针对单个试验者而言的。这说明了存在有易发生严重转向失效的情况,容错控制

的汽车转向具有较好的操纵性能,实验证明这种方法能改善车辆的转向性能,提高车辆的安全性和可靠性。

6 结束语

(1) 容错横摆力矩管理通过SBW、ESC和DTD来实现。在线控制转向系统失效的情况下,根据驾驶员的旨意,能激活ESC或DTD。

(2) 驾驶员—车辆闭环系统模拟表明,在前障碍避让过程中,基于多样性的汽车线控转向容错能有效处理转向失效。

(3) 基于多样性的汽车线控转向容错构架在SBW系统内没有过多冗余,它能够改善车辆的安全性和可靠性。

参考文献(References):

- [1] 田承伟,宗长富,王 祥,等. 线控转向汽车传感器的容错控制[J]. 吉林大学学报:工学版,2010,40(1):6-12.
- [2] 何 磊,宗长富,田承伟,等. 线控转向汽车直流电机的故障诊断与容错控制[J]. 吉林大学学报:工学版,2011,41(3):608-612.
- [3] 吴方圆,孔 峰,姚江云. 线控转向汽车传感器的智能容错设计[J]. 计算机仿真,2012,29(5):343-347.
- [4] 何 磊,宗长富,江国华,等. 线控转向汽车动力电池电量估计及容错控制方法[J]. 吉林大学学报:工学版,2012,42(s1):17-21.
- [5] 胡静波,朱发勇. 装载机线控转向容错设计与实现[J]. 长春工程学院学报:自然科学版,2008,9(3):14-16.
- [6] 邱 明. 汽车可变转向比电动助力转向系统原理与仿真[J]. 机电工程,2004,21(8):47-50.
- [7] 耿 谦,林小哲,王 耘,等. 基于虚拟样机的汽车助力特性仿真分析[J]. 机电工程,2008,25(3):88-90.
- [8] 程寿国,陈小龙. 汽车电动助力转向系统改装技术研究[J]. 机电工程,2013,30(3):314-317.
- [9] ZUO G, KUMAMOTO H, NISHIHARA O, et al. Quantitative reliability analysis of different design alternatives for steer-by-wire system [J]. **Reliability Engineering and System Safety**, 2005, 89(3):241-247.
- [10] KUMAMOTO H. Satisfying Safety Goals by Probabilistic Risk Assessment[M]. Berlin:Springer,2007.

[编辑:张 翔]

本文引用格式:

邓艳宁,金宇航. 基于多样性的汽车线控转向容错研究[J]. 机电工程,2014,31(2):177-181.

DENG Yan-ning, JIN Yu-hang. Fault-tolerant automobile steering based on diversity of steer-by-wire[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2014, 31(2): 177-181.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>