

# 路面附着系数识别方法发展现状综述及展望

袁朝春 张龙飞 陈龙

(江苏大学 汽车与交通工程学院 江苏 镇江 212013)

**摘 要:** 轮胎-路面附着系数的识别对于汽车稳定性及安全性具有重要意义。针对目前国内外路面识别的方法进行讨论,根据识别原理展开综述,阐述了现有的两大类识别方法,重点介绍了基于车辆动力学响应的路面识别方法,并分析了不同方法的优势和弊端,针对不同用途提出适用的方法。最后对未来智能车的应用进行了展望,提出基于图像识别路面的必然趋势。

**关键词:** 路面;附着系数;识别方法;主动安全;智能汽车

**中图分类号:** U461.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5276(2018)02-0001-04

## Summary and Prospect of Development of Road Coefficient Identification Methods

YUAN Chaochun, ZHANG Longfei, CHEN Long

(School of Automotive and Traffic Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

**Abstract:** The identification of tire-road adhesion coefficient is of great importance to the stability and safety of vehicle. This paper discusses the identification method of the road surface at home and abroad and according to the principle of the identification, describes the existing two categories of the identification, introduces the method of road adhesion coefficient identification based on the response of vehicle dynamics and analyzes the advantages and disadvantages of both methods, proposes the method suitable for different purposes, then looks forward to the future of the application of the intelligent cars, proposes the inevitable trend of the road surface based on image identification.

**Keywords:** road surface; adhesion coefficient; identification method; active safety; smart vehicle

## 0 引言

随着汽车保有量的增加,交通事故发生率也随之递增。美国国家高速公路安全委员会(NHTSA)的调研表明,在道路交通事故中,有90%以上的事故是由于驾驶员的过失造成。其中,驾驶过程中人车路信息获取的难度成为影响交通安全和导致许多交通事故的最主要因素。尤其是在道路附着条件较差及突变的环境下,由于驾驶员对路面的判断不足,极易导致车辆发生碰撞及侧滑。为了减少事故的发生,主动安全系统成为发展的必然趋势,如ABS、ESP等。对于路面的有效识别,可以使系统实时根据路面附着信息改变控制策略,从而提高主动干预的作用,减少事故的发生。因此,路面识别对于保证安全驾驶具有重要的意义。另外,智能汽车在中高速行驶状态下,车辆动力学特性、道路-轮胎附着力特性等力学特性对自动驾驶安全的影响作用越发重要,仅依靠空间信息对制动、转向等执行机构进行决策和控制会引发一系列安全问题,如因雨、冰雪天气情况多发的车辆追尾碰撞、转向制动时的侧

滑和侧翻等交通事故。

## 1 国内外研究现状

目前国内外的科研人员在路面识别领域持续开展了多年的研究,取得了许多成果。根据路面识别结果可以分为两种:路面类型识别和路面峰值附着系数辨识,前者是先将路面划分为多个等级,通过大量试验获得每一等级路面相应的参数,再通过识别路面参数对应每一等级路面,间接获得当前路面的峰值附着系数;后者是直接通过设计模型算法计算出路面峰值附着系数。同样的,根据路面识别所依据的原理,可以分为两类:基于原因的识别方法(Cause-Based)和基于效应的识别方法(Effect-Based)<sup>[1]</sup>。路面识别方法的分类见图1。本文将根据识别原理展开综述。

### 1.1 Cause-Based 识别方法

Cause-Based 识别方法需要建立一个反映各个因素与路面附着系数关系的数学模型,通过测量相关因素,利用所设计的数学模型计算路面附着系数的大小<sup>[2]</sup>。影响路

基金项目:国家自然科学基金项目资助(51305167)

作者简介:袁朝春(1978-),男,江苏徐州人,工学博士,副教授,密歇根大学访问学者。主要研究领域为新能源汽车及主动安全,主持国家自然科学基金项目2项、省部级项目4项、横向课题2项;参与国家级项目3项、省部级项目3项。发表SCI/EI检索论文50余篇、申请发明专利100余件(已授权40件),获省部级科技进步二等奖2项。现为江苏大学汽车工程研究院副院长、江苏省载运工具新技术应用重点实验室副主任、江苏省新能源汽车维修中心副主任、江苏省汽车工程学会理事。曾获江苏省六大人才高峰、江苏大学青年学术骨干带头人、江苏大学青年文明号红旗手等荣誉称号。

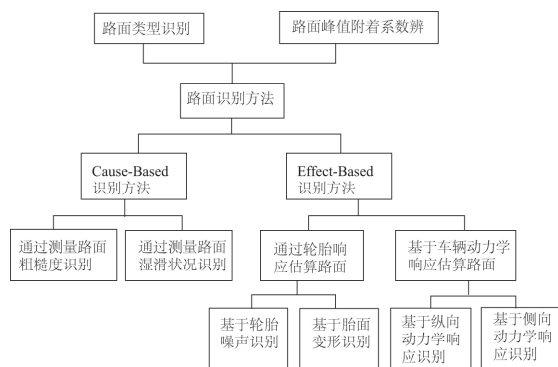


图1 路面识别方法分类

路面附着系数的因素主要包括路面类型参数、路面状态参数、轮胎参数以及整车参数<sup>[3]</sup>, 车辆参数可以直接获得, 但路面类型参数及路面状态参数需要依靠一定的传感器进行测量。例如, Breuer B 等人<sup>[4]</sup>最早提出利用光学传感器测量影响路面附着系数的主要物质, 在汽车通过地面之前实现提前判断路面情况; 文献[5]提出利用激光束识别路面, 结果表明, 其准确率高达 98%; 文献[6]通过测量路面对光的散射及吸收状况, 辨识路面上可能降低附着系数的物质, 作为判断路面附着系数变化的依据。由于光学传感器受环境影响较大, pieter L 等人<sup>[7]</sup>提出采用声波发射装置以特定的声波和发射角度向路面连续发射声波, 分析接收到的声波频谱, 估算出路面的粗糙度, 从而识别路面; 文献[8]通过采集路面对电磁波的反射频谱分析识别路面类型; 也有利用红外传感器以及温湿度传感器通过分析太阳辐射强度对路面温度的影响, 识别准确率可达 90%<sup>[9]</sup>; 近年来, 基于图像处理和特征识别技术的研究也逐渐增多<sup>[10]</sup>, 通过图像特征及空间频谱规律对路面进行划分。文献[11]提出一种基于摄像机的路面预测方法, 稳定性较好, 但寿命较短。

Cause-Based 识别方法对路面的识别具有预测性, 可以在轮胎与路面接触前识别路面。但都需要加装额外传感器, 成本较高, 硬件复杂, 商业推广价值不大; 其次, 光学传感器对工作环境要求苛刻, 容易受外界因素影响, 鲁棒性较差; 另外, 该类方法需要通过大量的测试试验采集数据, 识别精度依赖于数据的准确性, 对未经测试的路面难以准确估算; 最重要的是, 该类方法主要测量的是影响路面附着系数的两个因素: 路面类型参数、路面状态参数, 并未考虑到轮胎参数及整车参数的变化, 其准确度必然随着车辆的使用及轮胎的磨损而降低。

## 1.2 Effect-Based 识别方法

Effect-Based 识别方法是通过测量分析由于路面变化引起的整车响应来估算路面附着系数的大小。该类方法一般无需增加额外的传感器, 且对工作环境要求不高, 因此受到很多关注。根据响应的类型, Effect-Based 识别方法可以分为两类: 基于轮胎响应识别路面和基于车辆动力学响应识别路面。

### a) 基于轮胎响应识别路面

轮胎响应根据响应形式的不同, 分为轮胎噪声响应和

胎面变形响应。

### 1) 通过测量轮胎噪声识别路面

汽车在行驶过程中轮胎与地面之间产生噪声, 不同道路路况下轮胎噪声也会有所差异, 通过声学传感器采集车轮与路面之间的噪声, 作为识别路面的依据。文献[11]提出利用麦克风采集噪声频率, 根据特征与路面进行匹配; Roth 等人<sup>[12]</sup>提出利用声学传感器测量轮胎与路面之间的噪声, 从而判别路面的峰值附着系数。但由于轮胎噪声产生机理比较复杂, 受到许多外界不确定性因素的影响, 很难据此准确估计路面峰值附着系数。

### 2) 通过测量胎面变形识别路面

此类方法需要应用胎面变形传感器, 近年来, 许多轮胎传感器已经研究用于轮胎变形的测量。Pohl R 等人<sup>[13]</sup>提出一种固定在轮胎内衬的表面声波传感器 (SAW), 通过胎面接触单元的机械应变估计路面附着特性。文献[14]利用无线压电式传感器获得胎面的变形, 通过刷子模型获得路面附着系数, 试验结果表明这种传感器能够很好的估计滑移率和路面附着系数; 文献[15]将磁性传感器嵌入到轮胎胎面中, 基于霍尔原理, 测量轮胎局部应变及应力, 进而识别路面峰值附着系数的大小, 试验表明该传感器在很小的轮胎纵向力情况下能很好地识别出路面的峰值附着系数。但此类传感器都需要能量自给以及实时数据的无线传输, 实用价值不大。卢俊辉等<sup>[16]</sup>提出基于车轮振动的路面识别方法, 通过小波分析车轮在不同路面的振动信号进行识别, 鲁棒性好, 但实时性差。

### b) 基于车辆动力学响应识别路面

车辆动力学响应又分为纵向动力学响应和侧向动力学响应。

### 1) 通过纵向动力学响应识别路面

目前, 国内外对于纵向动力学响应识别路面的研究较多, 此类方法都需要根据轮胎力获得附着率 (又称利用附着系数), 再根据车轮转速、车速信息得到车轮的滑移率。根据定义, 计算公式如式(1)、式(2)。

$$\mu = \frac{F_x}{F_z} \quad (1)$$

$$S = \frac{|\omega R - v|}{\max(v, \omega R)} \quad (2)$$

式中:  $F_x$  为轮胎所受纵向力,  $F_z$  为轮胎所受垂直载荷,  $\mu$  为车轮转速,  $v$  为汽车纵向速度,  $R$  为车轮半径。

通过对数据点的分析, 根据曲线形状识别路面。多数研究者认为曲线的斜率能够直接反映出路面附着系数的大小, 一般采用最小二乘法或卡尔曼滤波等方法得到曲线的斜率。文献[17]中 F. Gustafsson 最早提出基于小滑移率区间  $\mu-s$  曲线斜率的路面识别方法, 研究表明, 车辆在驱动工况下, 可以利用估计出的曲线斜率来识别不同路面的附着系数。文献[18-20]利用最小二乘法或 kalman 滤波器估计曲线斜率, 用于估计当前路面附着条件, 试验表明效果较好。此后许多研究者在此基础上进行了改进。文献[21]在此基础上通过带遗忘因子的递推最小二乘算法及 CUSUM 变化检测算法对路面附着系数进行估算。文献[22]设计了基于状态观测的路面识别方法, 通过卡尔曼滤波或滑模变结构轮胎力观测器, 结合刷子轮胎模

型,利用递归最小二乘法估算路面附着系数。文献[23]结合车载传感器和GPS数据通过纵向车辆模型估算,并利用最小二乘法实时估算曲线斜率来识别路面。文献[24]结合轮胎力学模型和UKF算法对轮胎纵向力和滑移率进行估计,进而得到不同附着系数路面条件下的曲线斜率,通过建立与典型路面之间的映射关系,快速准确地识别路面。

但用该方法在曲线斜率估算过程中需要较多的数据点,因此实时性较差,不适用时变路况,且对数据点的精度有较高的要求,很难适用于实车行驶过程。文献[25]设计了二阶非线性扩张状态观测器有效地估计利用附着系数,用简化的轮胎模型推导出了递推公式,根据最小二乘原理设计了峰值附着系数估计器。仿真结果表明,估计器能够快速有效地估计当前路面状态。文献[26]介绍了两种轮胎力的计算方法,并通过估计驱动轴车轮的滑移率和附着率,利用贝叶斯算法估算路面峰值附着系数。文献[27]采用结合Dugoff轮胎模型的非线性三自由度车辆估算模型,建立双容积卡尔曼滤波估计器,实现路面附着系数的估计。文献[28]提出基于Dugoff模型和扩展卡尔曼滤波器的路面识别方法,准确性较好。文献[29]提出独立于车辆纵向运动的实时路面附着系数估计方法,不需要特定的加速、减速工况,运用动态LuGre轮胎模型,通过施加激励制动转矩,利用自适应控制规则和最小二乘法估计实时路面附着系数。文献[30]采用七自由度车辆动力学模型,结合Burekhardt轮胎模型,提出基于模糊控制算法的路面识别方法。文献[31]提出基于路面特征因子的识别方法,并给出了7种典型路面的特征因子阈值和区间,根据估算的实时特征因子落入的特征区间作为当前识别的路面状态,识别准确率高,但是对跃变路面的识别存在局限性。张晓云等人<sup>[32]</sup>提出一种基于实时滑移率的动态识别方法,并设计了典型路面的动态识别区间;随后又提出<sup>[33-35]</sup>基于路面特征系数和基于峰值附着系数变化范围的路面识别方法,但该方法精度依赖于估算,实际应用意义不大。文献[36]提出基于能量法路面附着系数识别方法,构建了针对摩擦制动器作用时的路面附着系数求解模型,效果较好,但对于变路面有待进一步研究。文献[37]引入接近度的概念,提出基于路面特征参数和防抱制动过程的路面识别方法,通过最大接近度原则识别路面状态。文献[38]基于不同车辆动力学模型的路面附着系数估计方法进行了对比,通过仿真及台架试验对比,对3种模型提出了改进。

## 2) 通过侧向动力学响应识别路面

文献[39]提出一种基于先进汽车线控转向系统的轮胎与路面附着系数估计方法,利用卡尔曼滤波算法设计估计器,在没有制动工况参与的前提下,估算精度较高。文献[40]通过侧向加速度传感器信息估算路面附着系数,再基于横摆角速度偏差及侧向加速度偏差进行双非线性度表征量综合补偿和修正,在实车验证中实时性和鲁棒性较好。文献[41]一种基于SVM的路面摩擦系数识别方法,可以在不同道路条件下的转向过程有效地识别路面附着系数。文献[42]提出基于车辆侧向动力学的路面附着系数估计方法,利用DGPS系统测量轮胎横向力模型参

数,结合陀螺仪信息识别路面附着系数,结果表明识别效果实时性较好,对纵向工况要求较低。文献[43]提出一种基于车辆转向的路面附着系数估计算法,并通过刷子轮胎模型推导出路面附着系数和车辆转向的关系。文献[44]利用扩展卡尔曼滤波器估算车轮侧偏角,采用反向传播神经网络算法,结合横摆角速度,判断路面的附着状况。文献[45]建立了非线性刷子轮胎模型和车辆线性模型,基于双扩展卡尔曼滤波算法,实现对线控汽车轮胎侧偏角以及路面附着的估计。

多数研究只考虑车辆纵向或者横向动力学,估计的路面附着系数偏小,文献[46]提出结合纵向和侧向的轮胎刷子模型,通过线型递归最小二乘法来识别,识别精度较高,且对于对开路面有很好的效果。文献[47]结合了纵向动力学和侧向动力学识别方法,通过一定的切换规则提高了估计的精度和鲁棒性。

Effect-Based识别方法作为一项随着ABS和TCS等车辆动力学控制系统的发展而产生的技术,采用车辆本身的动力学参数来对车轮所处路面进行判别的方法,不但能够采用车辆防滑控制系统固有的传感器简化系统结构并降低成本,而且也能够保证路面的判别的准确性。与Cause-Based识别方法采用直接测量或采用光、电传感器以及数字图像分析和频谱分析的方法相比,具有一定的优势和更为广阔的应用前景。

## 2 存在问题

综上所述,国内外许多学者在路面识别领域已经做了许多工作并取得一定的成果。但是众多识别方法各有利弊,通过传感器对路面参数进行直接测量的识别方法,预测性强、识别准确率高,对于汽车智能化具有很大的作用,但硬件复杂,工作环境要求较高;通过测量轮胎噪声的识别方法,实时性强,但鲁棒性差;通过测量轮胎变形的识别方法,精度较高,但需要无线传输,能力自给,成本高;通过曲线形状进行识别的方法适用于各种工况,但需要的大量数据,实时性不强;根据路面状态特征值进行识别的方法,鲁棒性较高、识别准确率高,但对跃变路面的识别有局限性;通过侧向动力学的识别方法,需要GPS,尚未普及,不利于实车应用。综合利弊,基于车辆响应特性的路面识别方法具有成本低,适用范围广,鲁棒性好的优点,对于主动安全系统的发挥有着重要的作用。

## 3 结语

现有的路面识别方法基本满足了汽车主动安全系统的需求,可以有效提高系统的准确性,达到主动干预的效果。但是多数还停留在仿真阶段,实际行驶过程路面及环境复杂多变,如何保证路面识别方法的精度及鲁棒性将会是研究的重点。另外,随着汽车智能化的推广,路面识别不再是简单地应用于ABS、ESP等安全系统,而是关系到每个环节。典型的智能汽车包括感知系统、规划-决策系统、控制系统及执行装置。感知系统应用车载雷达、摄像头等传感器,不仅需要获得车辆姿态信息,还需要提前感



知路面信息,为科学的规划-决策提供依据,这也对路面识别的预测性提出了很大的要求。文献[48]提出基于机器视觉的路面状态识别,通过摄像头提取路面信息,根据颜色和纹理特征识别路面,并通过几种典型路面的试验分析得到了验证。**基于机器视觉的路面识别方法的优势在于探测范围广、预测性强**,由软件直接控制,便于后续升级,必将是未来智能车的主流,但是**处理光线环境变化以及排除图像干扰信息的问题会是一大难点,有必要研究抗干扰能力强和对路面图像识别准确率更高的方法。**

另外,基于车辆动力学响应的识别方法与基于图像的识别方法的有效结合,可以充分解决实时性与准确性冲突的问题,基于车辆动力学响应的识别方法准确地识别路面为基于图像的识别方法提供参考,基于图像的识别方法根据摄像机所拍图像特征判断路面的变化趋势,包括颜色、纹理、形状、空间关系等特征,通过隐马尔科夫模型可以提前预测路面变好或者变坏,对后续路面进行修正,为智能汽车的感知及决策系统提供依据。

#### 参考文献:

- [1] 余卓平,左建令,张立军.路面附着系数估算技术发展现状综述[J].汽车工程,2006,28(6):546-549.
- [2] 漆燕.汽车防撞预警相关路面状态识别的研究[D].武汉:华中科技大学,2013.
- [3] 陈明.汽车主动防撞预警系统的路面识别研究[D].长春:吉林大学,2011.
- [4] Breuer B, Eichhorn U, Roth J. Measurement of tire/road-friction ahead of the car and inside the tire[C]//International Symposium on Advanced Vehicle Control, Yokohama, Japan, 1992.
- [5] John Laurent, Mario Talbot, Michel Doutcet. Road surface inspection using laser scanners adapted for the high precision 3D measurements of large flat surfaces[C]//3-D Digital Imaging and Modeling, International Conference on Recent Advances, May 12-15, 1997: 303-310.
- [6] 赵祥模,马荣贵,施维颖.基于PSD的路面粗糙度快速检测方法研究[J].大气与环境光学学报,2004,17(2):58-60.
- [7] Pieter L, Swart, Beatrijs M, Lacquet. An Acoustic Sensor System for Determination of Macroscopic Surface Roughness[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1996, 45(5): 879-884.
- [8] Brgeson J. Sensor data fusion based estimation of tire-road friction to enhance collision avoidance[C]//Tampere University of Technology, 2010.
- [9] 卢俊辉,王建强,李志强等.基于路面温度和太阳辐射强度的路面状态识别方法[J].农业机械学报,2010,11(5):21-23.
- [10] 潘玉斌.商用车牵引力控制系统的路面识别算法研究[D].长春:吉林大学,2008.
- [11] Holzmann F, Bellino M, Siegwart R, et al. Predictive estimation of the road-tire friction coefficient[J]. IEEE International Conference on Control Applications 2006: 885-890.
- [12] Eichhorn U, Roth J. Prediction and monitoring of tire/road-friction[C]//FISITA Congress, 1992: 67-74.
- [13] Alfred Pohl, R Steindl, L Reindl. The Intelligent tire utilizing passive SAW Sensors—Measurement of tire friction[J]. IEEE Trans. Instrum, 1999, 48(6): 1041-1046.
- [14] Erdogan Gurkan, Alexander Lee, Rajamani Rajesh. Estimation of Tire-Road Friction Coefficient Using a Novel Wireless Piezoelectric Tire Sensor[J]. IEEE Sensors Journal, 2011, 11(2): 267-279.
- [15] Tuononen A. On-board estimation of dynamic tyre forces from optically measured tire carcass deflections[J]. International Journal of Heavy Vehicle Systems, 2009(16): 362-378.
- [16] 卢俊辉,巫世晶.基于车轮振动的路面实时识别研究[J].振动与冲击,2008,166(4):19-22.
- [17] Gustafsson F. Estimation and Change Detection of Tire-road Friction Using the Wheel Slip[J]. IEEE International symposium on computer-aided control system design, 1996, 15(18): 99-104.
- [18] Yi K, Hedrick K, Lee S C. Estimation of Tire-road friction using observer based identifiers[J]. Vehicle System Dynamics, 1997, 31(4): 233-261.
- [19] Li K, Misener J. On-board road condition monitoring system using slip-based tyre road friction estimation and wheel speed signal analysis[J]. Proc. IMech E, Part K: J. Multi-body Dynamics, 2007, 221(1): 129-146.
- [20] Jorge V, Brigitte d, Michel F et al. A diagnosis-based approach for tire-road forces and maximum friction estimation[J]. Control Engineering Practice, 2011, 19(2): 174-184.
- [21] 赵又群,林葵.基于虚拟试验的路面附着系数估计[J].吉林大学学报(工学版),2011,41(2):22-28.
- [22] 张进.基于路面识别的车辆纵向动力学控制[D].长春:吉林大学,2015.
- [23] 龚节坤.基于实时路面附着条件的跟驰模型研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2015.
- [24] 林葵,黄超.采用UKF算法估计路面附着系数[J].哈尔滨工业大学学报,2013,45(7):121-126.
- [25] 吴利军,王跃进,李志强.面向汽车纵向安全辅助系统的路面附着系数估计方法[J].汽车工程,2009,31(3):239-243.
- [26] 赵立军,邓宁宁,葛柱洪等.四轮驱动车辆路面附着系数实时估计[J].哈尔滨工业大学学报,2014,46(11):42-46.
- [27] 解瑞春.基于信息融合技术的车辆行驶状态估计算法研究[D].锦州:辽宁工业大学,2015.
- [28] Chen Yan, Wang Junmin. Vehicle Longitudinal Motion Independent Real-Time Tire-Road Friction Coefficient Estimation[J]. 49th IEEE Conference on Decision and Control, 2010, 15(17): 2910-2915.
- [29] Zhu tianjun Zong-Changfu. The Road Friction Coefficient Estimation Based on Extended Kalman Filter[C]//Intelligent Systems and Applications, 2009. ISA 2009. International Workshop on, 2009: 1-4.
- [30] Feng W, Xiao-bin F, Ye-ming Z, et al. Fuzzy Identification Based on Tire/road Adhesion Feature[J]. Computer Aided Drafting, design and Manufacturing, 2015, 25(1): 62-67.
- [31] 王博,孙仁云.基于状态特征因子的路面识别方法研究[J].汽车工程,2012,34(6):506-510,522.
- [32] 张晓龙,孙仁云,李锋等.基于动态识别区间的路面识别方法研究[J].湖北汽车工业学院学报,2014,28(3):21-24.
- [33] 张晓龙,孙仁云,刘长伟等.基于路面特征系数的路面识别方法研究[J].中国测试,2015,41(8):31-35.
- [34] 张晓龙,孙仁云,葛恒勇等.基于峰值附着系数变化范围的路面识别研究[J].科学技术与工程,2015,15(11):117-121,130.

(下转第7页)

去除包套,便可得到如图4所示的缩小比例机匣零件。



图4 热等静压缩小比例机匣

## 2.3 结果分析

表1为热等静压机匣零件主要尺寸及误差。从表中可以看出,所有尺寸相对误差均 $<3\%$ ,在可接受范围内。

表1 热等静压机匣主要尺寸及误差

名义尺寸/mm	实际尺寸/mm	绝对误差/mm	相对误差/(%)
$\phi 60$	$\phi 60.12$	0.12	0.2
$\phi 70$	$\phi 69.50$	-0.50	-0.7
$\phi 80$	$\phi 78.60$	-1.40	-1.75
$\phi 100$	$\phi 102.18$	2.18	2.18
100	97.20	-2.8	-2.8
116	112.84	-3.16	-2.72
8	7.84	-0.16	-2
10	9.78	-0.22	-2.2
34	33.26	-0.74	2.18
24	24.24	0.24	1

## 3 结语

1) 热等静压整体近净成形工艺是制造难切削金属材料复杂零件的先进方法,是解决难切削金属材料复杂零件制造难题的有效途径。

2) 采用热等静压整体近净成形出了尺寸较为精确的钛合金复杂形状零件,证明所用方案切实可行。

参考文献:

- [1] 闫晨强. 解析航空材料技术的现状与未来发展空间[J]. 现代工业经济和信息化, 2015, 5(2): 76-77.
- [2] 杨金发, 李家永, 杨楠. 航空发动机典型零件加工技术及装备[J]. 世界制造技术与装备市场, 2016(2): 100-102.
- [3] 李传奇. 铣削方式对钛合金TB6加工硬化影响研究[J]. 新技术新工艺, 2015(8): 98-101.
- [4] 赵明汉, 邵冲, 李俊涛, 等. 高温合金精密铸造工艺技术的发展[J]. 新技术新工艺, 2005(10): 37-38.
- [5] 张方, 袁忠林, 邵彦博. 航空锻造技术的应用现状及发展趋势[J]. 航空制造技术, 2015, 476(7): 60-63.
- [6] 曲选辉. 粉末冶金技术在航空发动机中的应用[J]. 航空材料学报, 2014, 34(1): 1-10.
- [7] 张义文. 热等静压技术新进展[J]. 粉末冶金工业, 2009(4): 32-40.
- [8] 郎利辉, 布国亮, 薛勇, 等. 钛合金热等静压模拟本构关键参数确定及工艺优化[J]. 塑性工程学报, 2011, 18(4): 34-38.
- [9] 黄俊. Ti6Al4V合金整体零件的两步热等静压近净成形工艺探究[J]. 中国机械工程, 2015, 26(18): 2539-2544.
- [10] 王基维. 难加工材料热等静压近净成形工艺基础及零件性能研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
- [11] 马福康. 等静压技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1992.

收稿日期: 2016-09-22

(上接第4页)

- [35] 张晓龙, 孙仁云, 李锋, 等. 基于平均附着系数的路面识别方法研究[J]. 中国测试, 2014, 40(6): 99-103.
- [36] 王丽. 基于能量法的路面附着系数识别方法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2012.
- [37] 齐志权, 王宝锋, 裴晓飞, 等. 基于路面特征参数和制动防抱调节特征的路面识别方法[J]. 汽车工程, 2014, 36(3): 310-315.
- [38] Fodor D, Enisz K, Doman R, Toth P. Tire Road Friction Coefficient Estimation Methods Comparison Based on Different Vehicle Dynamics Models[J]. Vehicle Power and Propulsion Conference, 2011: 1-4.
- [39] 郑宏宇, 陈国迎, 孙琳琳, 等. 基于线控转向系统的路面参数估计[J]. 吉林大学学报(工学版), 2014, 44(2): 292-295.
- [40] 李亮, 朱宏军, 陈杰, 等. 用于汽车稳定性控制的路面附着识别算法[J]. 机械工程学报, 2014, 50(2): 132-138.
- [41] Shoutao Li, Xinglong Pei, Yongxue Ma, et al. A New Road Friction Coefficient Estimation Method Based on SVM[J]. International Conference on Mechatronics and Automation, 2012: 1910-1914.
- [42] Jin-oh hahn, R Rajamani. GPS-Based Real-Time Identification

of Tire - Road Friction Coefficient[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2002, 10(3): 331-343.

- [43] Sanghyun Hong, J. Karl Hedrick. Tire-Road Friction Coefficient Estimation with Vehicle Steering[J]. IEEE Intelligent Vehicles Symposium, 2013, 36(1): 1227-1232.
- [44] 陈无畏, 刘翔宇, 黄鹤, 等. 车辆转向工况下的路面附着系数估计算法[J]. 汽车工程, 2011, 33(6): 521-526.
- [45] 李明. 线控汽车轮胎侧偏角和路面附着系数估算算法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2011.
- [46] Choi M, Oh J. J., Choi - S. B.. Linearized Recursive Least Squares Methods for Real-Time Identification of Tire - Road Friction Coefficient[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2013, 62(7): 2906-2918.
- [47] Changsun Ahn, Huei Peng, Tseng H. E.. Robust estimation of road friction coefficient[J]. American Control Conference, 2011, 21(1): 3948-3953.
- [48] 李虹. 基于机器视觉路面状态识别关键技术研究[D]. 长春: 吉林大学, 2009.

收稿日期: 2016-07-22