

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2011.11.020

卫星定位收费系统车载收费 地图定义和地图匹配方法

王东柱, 朱书善, 刘楠

(交通部公路科学研究院 国家智能交通系统工程技术研究中心, 北京 100088)

摘要: 根据我国现有封闭式收费高速公路的特点, 定义了一种新的由收费关键点和关键路段组成, 满足卫星收费系统路段识别需求的车载电子地图。基于收费地图定义, 提出了一种新的路段识别匹配方法。在路段识别匹配过程中, 采用随车速动态调节搜索匹配范围的方法。地图路段匹配方法将路段识别变成关键点识别, 根据计费标示值和路段属性识别判断道路出入口和经过路段, 结合路段邻接关系避免相邻其他车道点对路段识别的干扰。文中最后对本方法在卫星收费试验系统中的应用进行了简要描述, 并对提高路段识别的措施进行了讨论。

关键词: 交通工程; 卫星收费; 关键点; 关键路段; 入口; 出口; 地图匹配

中图分类号: U491

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268 (2011) 11-0115-06

Definition of Map on OBU and Map-matching Algorithm for GPS-based ETC System

WANG Dongzhu, ZHU Shushan, LIU Nan

(Research Institute of Highway, Ministry of Transport, Beijing 100088, China)

Abstract: This article described a new definition of map on OBU for GPS-based ETC system. Key points and key links were defined on the new map according to the character of enclosed toll expressway in China to meet the link identification needs of GPS-based ETC system. A new map-matching algorithm was proposed based on this map definition. The GPS search area changed with the vehicle running speed during the map-matching process. The map-matching algorithm first matched GPS data to the key nodes on map instead of links, then matched the passing links, entry and exit links according to the charging status and link property, and identified the links by adjacency relation to avoid the interference from the vehicles on the links nearby. At last, the applications of the presented method in GPS-based ETC experiment system were described and the measures for improving the accuracy of map-matching were discussed.

Key words: traffic engineering; GPS-based ETC; key point; key link; entry; exit; map-matching

0 引言

基于卫星定位和无线接入技术的电子不停车收费系统, 是目前世界上最先进的道路收费技术之一。它的特点是无须在收费道路出入口处设立收费站, 在车辆正常速度行驶中完成收费过程, 可以极大的提高通行和收费效率, 并具有减少土地占用、降低

污染等不可替代的优势^[1]。其中系统对收费路段的精确识别技术保证了收费的准确性, 是该收费技术的核心^[2]。

收费路段识别技术是收费系统能够识别车辆当前行驶所在的路段, 对行驶在收费路段的车辆进行通行费用计算。收费路段的识别靠 GPS 采集的车辆位置点与地图收费路段信息的匹配来完成。

收稿日期: 2011-04-11

基金项目: 国家“十一五”科技支撑计划项目 (2006BAG01A04)

作者简介: 王东柱 (1966-), 男, 河南郑州人, 高级工程师。 (wangdrew@163.com)

卫星定位收费系统路径识别部分运行于安装在车辆上的车载设备中,车载设备主要包括GPS定位模块、GSM/GPRS无线通信模块、车载收费电子地图等。车辆行驶时车载终端以每秒一次的频率接收GPS车辆位置信息同时和车载地图上的收费路段相匹配进行路段识别,如果识别路段为收费路段,系统开始车辆进行计费,当系统判断车辆离开收费道路时,车载设备会将车辆经过的收费路段信息和通行费用信息通过无线通信发送到后台管理中心^[3]。因此路段识别成功与否与车载收费地图定义、GPS定位精度、车载设备硬件资源、地图匹配方法等密切相关。

目前关于国外道路收费方面技术资料大多限于对收费系统的介绍,而收费路段识别技术介绍很少。常规的用于导航系统中的地图匹配方法是通过投影距离和车辆行驶方向与路段矢量方向差值加权的方法来进行地图匹配,判断出车辆行驶的路段^[4]。由于这些方法需要完全的地图路段信息、较大的计算能力和存储单元,从而增加了车载设备的成本。另外需要判断匹配的路段较多,对GPS信号可靠性的要求也比较高。加之道路收费自身的一些特点,上述方法不适合道路收费使用。

此外路段识别的准确性与电子地图的精度和GPS定位精度密切相关,在两者达到一定精度条件下,路段识别过程会更加迅速和准确。下面对两者的精度的提高措施进行分析:

(1) 地图精度:卫星收费使用的电子地图要求定位精度较高且满足道路收费的要求,目前国内还没有专门用于道路收费的电子地图,普通地图也存在精度不准确的问题。委托地图供应商制作高精度的用于卫星定位收费的电子地图是德国等国外卫星收费系统采取的通用做法。由于受到资金和时间的限制,在实际操作中可以根据收费电子地图的要求,采用高精度差分GPS定位设备在现有电子地图的基础上对关键点和路段位置进行采集、校准和编辑,来保证地图信息的准确。

(2) GPS定位精度和可靠性是目前困扰GPS定位收费的主要问题^[2],目前民用GPS定位精度仅有10~15 m^[5],难以区分距离相近的两条路段。采用惯性导航或内置陀螺仪可以大大提高定位精度,但是受车载设备成本限制^[6],在车载设备中不太可能采用高精度的GPS定位模块。

在GPS精度难以保证的情况下,本文围绕车载收费电子地图的定义和识别匹配方法的优化来解决

卫星收费中路段识别的问题。文中首先根据我国高速公路收费特点,定义了一种新的满足卫星收费需求的车载收费电子地图,其次在识别匹配方法上通过定义路段关键点和关键路段属性,将路段识别变成关键节点识别,以点结合路段邻接关系识别路段从而避免相邻其他车道节点对路段识别的干扰。

1 车载收费电子地图的定义

和德国等国家按里程计费的收费方式不同^[2],我国高速公路大多采用封闭式收费系统,即在收费公路所有出入口设立收费站,高速公路对外界呈“封闭状态”。封闭式收费系统由主线收费站和匝道收费站组成,主线收费站设置在高速公路两端,匝道收费站设置在匝道上。车辆按进出收费站出入口进行收费^[7]。因此车载收费地图的定义需要围绕这些特点进行。

1.1 收费关键点及收费路段定义

本文描述的车载收费地图由关键点和关键路段组成,关键点和关键路段是收费道路上的对道路走向和计费起到关键作用的点和路段。通过对现有高速公路布局和收费情况的分析,我们定义3种类型的关键点和3种类型的路段。入口点、出口点、经过点和入口路段、出口路段、经过路段。

入口点是车辆经该点进入收费道路的点,和高速公路入口收费站对应;出口点是车辆经该点离开收费道路的点,和高速公路出口收费站对应。经过点,对于匝道收费站而言,是匝道和主路的交汇点,该点同时属于主路和匝道;由此定义入口点和经入口匝道与主路交汇的经过点组成的路段为入口路段;出口点和经出口匝道与主路交汇形成的经过点组成的路段为出口路段;经过点与经过点连接组成的路段为经过路段,多个相连接的经过路段组成主路路段。

1.2 主线站出入口特殊处理

主线收费站和匝道收费站不同,主线收费站出入口都是在主路上,为和上面定义保持一致,需要对主线收费站出入口做特殊处理,添加一个入口路段和出口路段。入口路段是从主线站入口开始沿道路方向,在入口和下一个经过点的中间位置附近的道路上添加一个新的经过点,新经过点一端连接主路入口、另一端连接下一经过点,从入口到新经过点形成主路入口路段;同理出口路段是从主线站出口开始沿道路相反方向,在出口和上一经过点的中间位置附近添加新经过点,形成主路出口路段。注意新经过点位置应均匀分布,不能过于靠近下一经

过点和出入口。

1.3 收费关键点和收费路段属性值的定义

关键点属性值的定义是为了区分出入口关键点, 不能用来区分判断出入口, 对于车辆进出收费道路起到辅助识别作用, 入口关键点属性值为 0; 出口关键点属性值为 1; 经过点属性值为 2。

本文定义 2 种路段属性值, 路段识别属性值和路段长度属性。

路段识别属性值: 出入口的识别是收费路段识别最重要的部分, 出入口识别靠设置路段识别属性值来实现, 路段识别属性值定义为 3 种, 收费路段入口识别属性值为 0; 收费路段出口识别属性值为 1; 中间路段识别属性值为 2。

路段长度属性值: 考虑到将来进行按里程收费扩展, 设置路段长度属性, 这里是指各个点之间道路的实际长度值, 而非我们定义的关键路段的长度。

图 1 为本文定义的车载收费电子地图的示意图。图中关键点①为匝道收费站入口, 关键点④为匝道收费站出口, 关键点⑥为主线收费站入口。因此我们定义①、⑥为入口点, ④为出口点。②、③、⑤是经过点, ②为入口①经匝道和主路交汇点, ③是主路和匝道出口④的交汇点。其中①和②组成入口路段, ③和④组成出口路段, 图中黑色线段表示。⑤和②、②和③为经过路段。其中⑤为添加的新经过点, ⑤与⑥形成入口路段, ⑤与②形成经过路段。路段邻接关系以箭头方向顺次相连。

各个路段识别属性如图 1 中所示, 入口路段①②和⑥⑤的识别属性值为 0; 出口路段③④的识别属性值为 1; 经过路段⑤②和②③的识别属性值为 2。

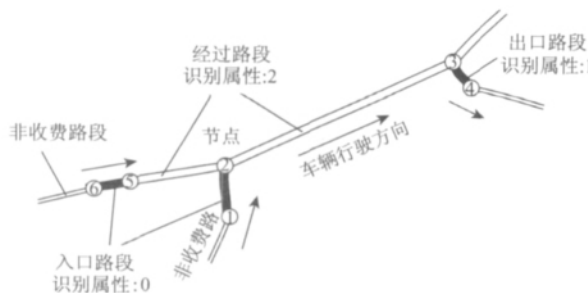


图 1 卫星收费系统中车载收费电子地图定义

Fig. 1 Map definition on OBU in

GPS-based ETC system

1.4 关键点地理位置的选择和校准

关键是车辆定位及路段识别的重要点, 在 1.3 中给出了关键点的定义和大致位置, 但是具体的位

置选择还应考虑在定位过程中 GPS 信号在关键点定位的准确和可靠。此外关键点所处位置与 GPS 与其匹配范围密切相关, 如果关键点所处位置车道数较多, 匹配范围也会相应的加大, 产生误判几率也随之增加。

(1) 关键点选择的位置

关键点位置选择应考虑的原则是: a. 关键点选在开阔空间, 远离树木、建筑物、桥下等易于遮挡的位置; b. 关键点选择在正常道路上, 避开收费站和收费广场等面积大, 容易造成定位匹配错误的道路设施; c. 在匝道和主路交汇处, 关键点选择在匝道和主路结合处前方主路上。

(2) 关键定位的测试校准

关键点位置的校准包括地图上关键点的位置精度和 GPS 在该点关键点的定位精度。首先实地观察拟设定的关键节点位置, 确定关键点远离树木桥下等易于遮挡的位置。其次使用高精度差分 GPS 对关键点位置进行校准, 确保地图上关键点的位置精度。再次采用和车载设备相同类型的 GPS 接收器反复测试车辆通过关键点时 GPS 信号接收情况, 及时对 GPS 信号不可靠的关键点的位置进行调整。

(3) 增加辅助匹配点, 提高关键点的匹配准确性

可以有选择地在 GPS 信号可靠性差的关键点附近增加和该点编号相同的辅助点, 做到同一关键点, 不同位置多次重复匹配识别, 降低漏点风险, 进一步保障匹配准确性。

(4) 关键点后续维护

由于关键点设置位置与高速公路道路设施和路面情况有关, 在车载地图实际使用过程中仍然需要密切注意高速公路的道路变化, 随时对地图上关键点位置进行调整, 如高速公路车道扩宽、收费站改建等造成外部环境的变化。

图 2 (a) 为主线站收费广场关键点设置区域, 避开了面积较大、车道较多收费广场, 提高定位准确性。同理在匝道收费广场采取同样的方法。图 2 (b) 是匝道进入主路的情况, 为同时保证主路和匝道进入主路车辆的准确匹配, 本文将经过点设置在匝道和主路完全会合处前方。

需要注意的是系统计费是以出入口路段或长度计费的, 和关键点的具体位置无关, 所以收费站附近关键点设定不一定在收费路段上。

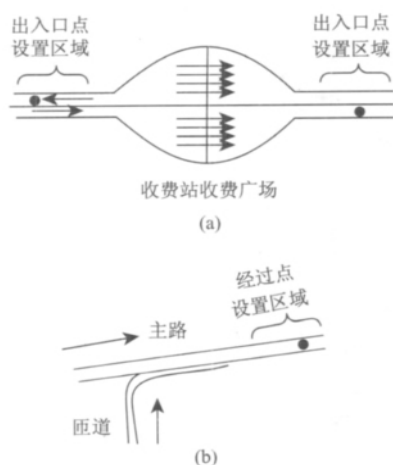


图2 收费站收费广场附近和匝道与主路交汇处关键点的设置示意图

Fig. 2 Key points near toll plaza and intersection of ramp-main road

2 地图匹配方法

2.1 动态调节搜索匹配范围

搜索匹配范围是车辆行驶时,以车辆GPS定位点为中心点,一个值为半径的区域内在收费电子地图上搜索关键点进行匹配。搜索范围的选取应考虑到GPS的精度误差,道路宽度等因素。选取过大会造成误判且加大计算量。另外,随着车速的加快,车速每秒行驶的距离大于匹配范围,跳过关键点,就会造成漏点。因此匹配范围的选取和车速有一定的关系。

本文提出了在保证基本匹配范围的条件下,匹配范围随车辆行驶速度动态调整的方法。匹配范围分为两个部分,基本值和变化值,实际搜索范围为两者之和

(1) 基本值的确定

搜索范围基本值的选取应考虑以下两个原则:一是搜寻范围应大于GPS定位精度的最大误差值,以保证在GPS存在误差条件下不丢点;二是搜索范围必须完全覆盖关键点所在道路同向所有车道。

由此可知,基本的搜索范围为GPS误差值与关键点所在道路宽度之和。

假如GPS定位误差为20 m,道路为两车道组成,每车道3.75 m,路侧间隙为各为0.8 m,则搜索范围 $search_scope = 20 + 2 \times 3.75 + 2 \times 0.8 = 29.1$ m。

(2) 动态搜索匹配范围值的确定

搜索范围可根据车速在一定范围内自动调节。经过反复测试,车辆在36 km/h速度下,搜索基本

值能够满足匹配要求;在车速高于36 km/h,搜索范围需要动态随车速的变化。

搜索范围变化值具体描述如下:

令初始搜索范围基本值: $search_scope = 30$ m, 实际搜索变化值为 $bound$ 。

当速度 $V < 36$ km/h, 搜索范围不变,为基本值, $bound = search_scope$; 当速度 $V > 36$ km/h, 实际搜索范围 $bound = V \times 1000 / 3600 + search_scope$ 。

通过对系统实际运行情况分析,这种匹配范围的定义是比较合理的。

2.2 车辆位置点与收费路段的匹配方法

本文描述的地图匹配方法主要是通过读取计费标志值区分车辆是否处在收费路段,对于未在收费路段上的车辆通过匹配关键点及读取路段的识别属性值进行入口判断,对于已在收费路段的车辆通过关键点、邻接关系和路段识别属性值进行计费 and 出口判断。通过路段判断出入口可以避免非收费道路上途经出入口车辆的干扰。由于存在路段邻接关系可以避免附近无相邻关系车道关键点干扰、确定车辆的前进方向,同时保留行驶路径信息,可以实现按路段里程收费。GPS定位信息和关键点匹配进行关键点的识别,从而由连续的关键点进行路段识别来实现的。

参数定义: 计费标志值为0时,车辆不在收费道路上;计费标志值为1时,车辆处在收费道路上。关键点记录集保存经过的关键点编号。搜索匹配范围基本值按2.1描述的方法确定,本例取搜索基本值 $search_scope = 30$ m。

下面是匹配方法的详细描述:

步骤1: 车辆启动,系统初始化,载入收费地图数据;计费标示值置0,通行费用置0,关键点记录集为空。

步骤2: 车载系统以1次/秒的频率接收GPS车辆定位信息,包括车辆坐标值、速度、时间等。

步骤3: 根据当前车辆的行驶速度 V 动态设定搜索范围 $bound$, $bound$ 值的选取参考2.1部分。

步骤4: GPS位置点和收费路段节点进行匹配:以GPS车辆位置点为中心, $bound$ 为搜索范围,与收费地图上收费关键点进行匹配;如果有道路收费关键点与车辆位置点匹配成功,且该点没有被记录,则执行步骤5,否则执行步骤2。

步骤5: 如果车辆所处位置是关键点,这里分下面3种情况处理:

1) 车辆未在收费道路上, 入口点未记录, 入口关键点判断: 如果计费标示值为 0, 记录集为空。读取关键点属性值, 如果是 0, 则该点是入口关键点, 在记录集中记录该关键点编号。返回步骤 2。

2) 车辆未在收费道路上, 入口点已记录, 入口路段判断: 如果计费标示值为 0, 记录集入口点已记录, 判断该关键点是否与上一点有邻接关系。如果存在邻接关系, 则判断两点所在的收费路段属性值, 如果该收费路段的路段类型是入口路段 0, 车辆进入收费道路开始计费过程, 执行步骤 6。否则返回步骤 2。

3) 车辆在收费道路上, 出口路段判断: 如果计费标示值为 1, 该点与上一点有邻接关系, 则, 记录该点编号, 判断两点所在的收费路段识别属性值: 如果该收费路段识别属性值为 2, 为经过路段, 执行步骤 7; 如果该收费路段识别属性值为 1, 为出口路段, 执行步骤 8; 否则执行步骤 2。

步骤 6, 进入收费道路, 计费开始: 置计费标示值为 1, 记录入口路段编号。返回步骤 2。

步骤 7, 计费: 记录路段编号, 返回步骤 2。

步骤 8 车辆离开收费道路, 计费结束, 回传数据: 分别考虑按出入口收费和按里程收费两种情况:

1) 如果按出入口收费, 则根据出入编号, 计算通行费用。将通行费用、出入口路段及所有经过的路段编号、入口时间、出口时间等信息, 通过无线传输发往后台管理中心;

2) 如果按里程收费, 则将所有经过路段的长度值相加求和, 计算出总的通行长度, 乘以费率, 得到通行费用, 将通行费用、所有经过路段编号、进入收费道路时间、离开收费道路时间等信息通过无线传输发往后台管理中心。

步骤 9, 计费程序结束。

图 3 为地图匹配的程序流程图。

3 方法验证试验

3.1 地图匹配方法验证

为了验证本方法的准确性, 研发初期我们选取比高速公路更为复杂的城市道路进行验证。图 4 为运行在车载工控机上的收费测试软件界面, 测试在行驶车辆上进行, 实时进行 GPS 信息采集、地图匹配和收费计算。以 2 元/km 费率计费。图中北三环主路、立交桥和知春路定义为收费道路, 其他道路为非收费道路。图 4 中圆点为车辆行驶轨迹点, 深色线段为收费成功路段。当车辆离开收费路段后, 收费计算停止, 软件显示收费里程为 21 km, 通行费

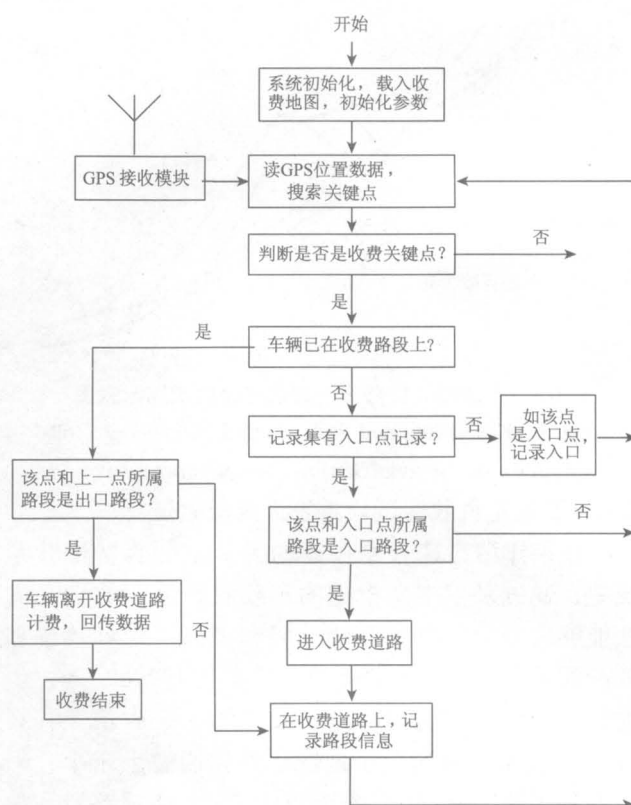


图 3 地图匹配方法的程序框图

Fig. 3 Flow chart of map-matching



图 4 北京市区收费试验软件测试界面

Fig. 4 Test interface of tolling software for testing the map-matching in Beijing urban area

用为 42 元。

图 5 是在京津塘高速公路金钟路收费站附近, 车辆行驶中对关键点和关键路段识别的示意图。图中关键点和关键路段按照本文第 1 节定义, 图中连续小圆点为车辆实际行驶轨迹, 关键点与某些车辆轨迹点一定近似符合。车辆在行驶中无需对地图实际路段的所有节点进行识别, 只需正确识别少量关键点就可以精确识别所在路段, 从而达到费用计算目的。

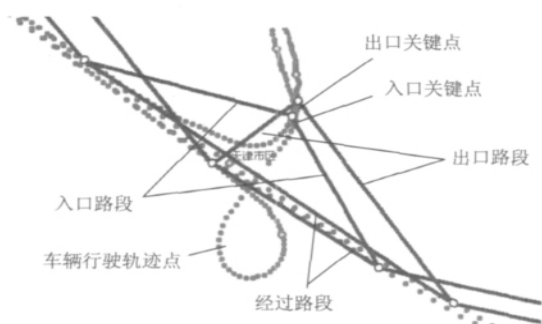


图5 京津塘金钟路收费站区域路段识别示意图

Fig. 5 Key points and links around Jingzhonglu toll plaza on Beijing-Tianjin-Tanggu expressway

3.2 卫星定位收费试验系统大规模验证

在京津塘高速公路搭建的卫星定位收费试验系统中,通过采用本文描述的车载收费地图的定义方法能够大大的节省了存储空间和提高了计算效率和匹配的可靠性。京津塘高速公路全长 142.69 km,由北京到塘沽,跨北京,河北和天津 3 个省市,共有 11 个收费站。普通电子地图实际路段有上千个,采用本方法共定义 70 个关键点和 85 个关键路段。如马驹桥收费站到采育收费站只需判断识别 4 个关键点、3 个路段,即可完成收费过程和得到路径信息。大大减少识别失误率,提高计算效率和识别的准确性。

在卫星定位收费试验系统运行中,进行了共有 300 多台车辆参与,历时 6 个月的运行试验,试验系统运行初期,路段识别方面出现的错误基本是由于车载地图关键点位置选择不当引起的,主要集中在收费站和桥梁附近,GPS 信号容易受到遮挡,特别在车速较快的情况。实验运行后期由于京津塘高速公路部分收费广场扩建造成关键点处于匹配范围之外,关键点丢失,造成匹配错误。这些问题在采用本文 1.4 部分的方法对关键点进行修正,出现的问题得到了很好的解决。收费电子地图和与之对应的路段识别方法组成的系统软件部分通过了国家权威部分的软件测试,得到了认可。

4 结束语

本文描述的方法虽然能够满足目前在高速公路试验系统中卫星收费的要求,但高速公路路况复杂,受各种因素的影响,GPS 信号的可靠性难以保证。对于难以定位或区分的点或路段,结合路侧设备辅助定位的方法是解决由于 GPS 信号不可靠引起路段识别不准问题比较好的方法^[8]。此外对于路段

识别过程中偶然出现的丢点问题,采用结合前后连续点智能判断的方法也可以对漏点进行弥补。我国北斗定位系统和欧洲伽利略系统的发展也是我们需要关注的方向。路段识别的准确性会随着全球定位技术的进步、车载设备成本的降低得到不断的提高。

参考文献:

References:

- [1] GERARD CHARPENTIER, GUY FREMONT, The ETC System for HGV on Highways in Germany: First Lessons after System Opening [C/CD] // 10th ITS World Congress. Madrid: ITS World Congress Organizing Committee, 2003.
- [2] TIP A. Satellite Navigation Based Tolling, the Real Constraints [C/CD] // 13th ITS World Congress. London: ITS World Congress Organizing Committee, 2006.
- [3] 宋向辉, 朱书善, 王东柱, 等, 基于卫星定位道路收费的车载设备: 中国, 200820080244. 5 [P] 2009-02-18.
SONG Xianghui, ZHU Shushan, WANG Dongzhu, et al. On Board Unite of GNSS - based ETC: China, 200820080244. 5 [P]. 2009-02-18.
- [4] BERNSTEIN D, KORNHAUSER A. An Introduction to Map Matching for Personal Navigation Assistants [EB/OL]. [2010. 7. 10] <http://www.njtude.org/reports/mapmatchintro.pdf>.
- [5] JORDÁN JG, SORIANO F, GRAULLERA D, et al. A Comparison of Different Technologies for EFC and Other ITS Applications [C] // Proceedings of 2001 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference. Oakland, CA, USA: IEEE, 2001: 25-29.
- [6] COSMEN - SCHORTMANN J. Method and Tool for the Analysis and Design of GNSS-only ETC System of Guaranteed Performance [C/CD] // 13th ITS World Congress. London: ITS World Congress Organizing Committee, 2006.
- [7] 刘伟铭, 王哲人, 郑西涛, 高速公路收费系统理论与方法 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2001.
LIU Weiming, WANG Zheren, ZHENG Xitao. The Theory and Method of Expressway Toll Collection System [M]. Beijing: China Communications Press, 2001.
- [8] 陈艳艳, 王东柱. 不完全动态信息条件下延误风险规避的分布式车载导航系统路线实时优化算法 [J]. 公路交通科技, 2006, 23 (12), 118-122.

(下转第 151 页)

参考文献:

References:

- [1] 李金玉, 勾志践, 李媛. 基于 ADAMS 的齿轮啮合过程中齿轮力的动态仿真 [J]. 机械, 2005, 32 (3): 15-17.
LI Jinyu, GOU Zhijian, LI Yuan. A Dynamic Simulation of Meshing Force in Gear Meshing Process Based on ADAMS [J]. Machinery, 2005, 32 (3): 15-17.
- [2] 汪红波, 马世平, 汪红刚. 基于 ADAMS 的锥齿轮传动系统动态特性仿真和可靠性疲劳分析 [J]. 机床与液压, 2007, 35 (12): 180-182.
WANG Hongbo, MA Shiping, WANG Honggang. Study on Dynamic Characteristics and Fatigue Analysis about Gear Transmission Based on ADAMS [J]. Machine Tool and Hydraulics, 2007, 35 (12): 180-182.
- [3] HOU Chi, WAN Xiaopeng, ZHAO Meiyang. Simulation Analysis Technique of Truck-like Landing Gear Based on ADAMS [J]. Journal of System Simulation, 2007, 19 (4): 909-913
- [4] 周焱强, 杨洁明, 田英. 基于 ADAMS 的齿轮动力学特性分析 [J]. 机械工程师, 2008 (6): 99-100.
ZHOU Yanqiang, YANG Jieming, TIAN Ying. Dynamic Analysis of Gear Based on ADAMS [J]. Mechanical Engineer, 2008 (6): 99-100.
- [5] 胡磊. 汽车主减速器螺旋锥齿轮参数化建模与有限元分析 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2008.
- HU Lei. Parameter Modeling and Finite Element Analysis for Final Drive Spiral Bevel Gear [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2008.
- [6] 曾韬. 螺旋锥齿轮设计与加工 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1989.
ZENG Tao. Design and Fabrication of Spiral Bevel Gear [M]. Harbin: Harbin Industrial University Press, 1989.
- [7] 刘洪丽. 基于 UG 二次开发的弧齿锥齿轮参数化造型 [D]. 锦州: 辽宁工学院, 2007.
LIU Hongli. Parameter Modeling of Spiral Bevel Gear Based on UG Second Development [D]. Jinzhou: Liaoning University of Technology, 2007.
- [8] HB Y. Dynamic Performance Simulation of a Tracked Vehicle with ADAMS Tracked Vehicle Toolkit Software [J]. Systems Modeling and Simulation: Theory and Applications, 2005, 3398: 553-558.
- [9] 王小林. 准双曲面齿轮齿面参数化和接触可视化方法研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2005.
WANG Xiaolin. The Visualization Methods Research of Hypoid Gear Tooth Surface Parameterization and Contact [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2005
- [10] 李英华. 基于 UG 和 ADAMS 的圆柱齿轮减速器的仿真分析 [J]. 山西科技, 2008 (5): 75-76.
LI Yinghua. Emulation Analysis on the Cylindrical Gear Reducer Based on UG and ADAMS [J]. Shanxi Science and Technology, 2008 (5): 75-76.

(上接第 120 页)

- CHEN Yanyan, WANG Dongzhu. Responsive Optimum Path Algorithm for Delay Risk Aversion Based Distributed Onboard Navigation System under the Condition of Incomplete Dynamic Information [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2006, 23 (12): 118-122.
- [9] CHEN Yanyan, BELL MICHAEL G H, WANG Dongzhu, et al. Risk-averse Time-dependent Route Guidance by a Constrained Dynamic A* Search in a Decentralized System Architecture [J]. Transportation Research Record, 2006, 1994: 51-60.
- [10] ESRI Company. ArcGIS Desktop Help [EB/OL]. (2005-05-02) [2010-05-09] <http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.1/index.cfm?TopicName=welcome>.
- [11] 张宏, 温永宁, 刘爱利. 地理信息系统算法基础 [M]. 北京: 科学出版社, 2006.
ZHANG Hong, WEN Yongning, LIU Aili. The Basis of Geographical Information System [M]. Beijing: Science Press, 2006.