

# 道路运输安全管理 MDAS 的设计与实现

孙棣华<sup>1</sup> 唐亮<sup>1</sup> 刘霞<sup>2</sup> 张强<sup>1</sup>

(重庆大学自动化学院 重庆 400044)<sup>1</sup> (重庆大学经济与工商管理学院 重庆 400044)<sup>2</sup>

**摘要** 针对目前道路运输安全管理决策缺乏针对性和有效性的问题,提出基于车载 GPS 监控数据,将多维分析技术应用到营运车辆 GPS 监控数据的分析,从而获得车辆的行驶规律,以加强安全管理。在对现有基础和条件进行分析的基础上,提出了道路运输安全管理 MDAS 总体解决方案,包括系统的全局网络拓扑结构和五层体系结构。设计了基于 DTS 和触发器的数据抽取器,分别利用概化和最近点估计地图匹配算法对非空间和空间数据进行预处理,设计了雪花 MDAS 数据仓库模型、MDAS 数据集及基于 MDX 的数据分析引擎。以此为基础,开发了重庆市道路运输安全管理 MDAS。应用表明,该系统符合道路运输安全管理决策支持的需求。

**关键词** 道路运输安全管理,多维分析,决策支持

**中图分类号** TP311 **文献标识码** A

## Design and Realization of MDAS for Transportation Safety Management

SUN Di-hua<sup>1</sup> TANG Liang<sup>1</sup> LIU Xia<sup>2</sup> ZHANG Qiang<sup>1</sup>

(College of Automation, Chongqing University, Chongqing 400044, China)<sup>1</sup>

(College of Economics and Business Administration, Chongqing University, Chongqing 400044, China)<sup>2</sup>

**Abstract** This paper introduced a method of applying the multi-dimensional analysis technology to the analysis of GPS monitoring data of commercial vehicles, for the purpose of solving the problems of the lack of pertinence and validity which exist in the process of decision-making in the roadway transportation safety management nowadays. After analyzing the application state in existence, a general solution of MDAS for the transportation safety management, including the global Network Topology framework and the five-layer system structure was presented. Moreover, a data extractor based on the DTS and the trigger was designed, and the non-spacial and spacial data were preprocessed with generalizability theory and the method of the nearest point estimation map-matching. Then, the snowflake model of the data warehouse, MDAS data collection and the data analysis engine based on the MDX were devised. On the basis of the above technologies, the MDAS for Chongqing City's roadway transportation safety management was developed and realized. The real application shows that MDAS meet the requirement of the decision support in transportation safety management.

**Keywords** Transportation safety management, Multi-dimensional analysis, Decision support

## 1 引言

道路运输安全管理 MDAS (Multi-Dimensional Analysis System, 多维分析系统) 是对 GPS 营运车辆监控系统产生的海量数据进行分析的系统。在道路运输安全管理决策中,通过 MDAS 来实现与之相关数据的多维综合分析,从而获取营运车辆的行驶规律(如超速),以辅助职能部门针对性地加强道路运输安全管理,预防道路运输事故的发生,促进道路运输安全管理模式由“事后处理”转变为“主动预警”。

目前,国外在道路运输安全管理方面做了大量的研究开发工作。例如,美国加利福尼亚的先进运输管理系统(AT-MS),通过集成各种路网的实时交通信息,为道路运输管理部门提供智能化的计算机辅助决策支持<sup>[1]</sup>。Ossowski 等人提出建立一种基于多代理的道路运输管理决策支持系统,其通

过各个代理之间的协同,完成对各种道路、车辆、信号、事故信息的分析处理,从而辅助道路运输控制中心制定决策<sup>[2]</sup>。我国的道路运输安全管理决策支持手段相对国外存在较大差距,现阶段仍以信息化系统建设及其集成应用为主,尚不能满足辅助道路运输安全管理决策的需要。

为此,本文针对道路运输安全管理的需求,研究道路运输安全管理 MDAS 的关键技术和方法,并在此基础上,开发了面向实际道路运输安全管理决策支持的 MDAS 应用系统。

## 2 道路运输安全管理 MDAS 总体解决方案

### 2.1 系统建立的条件

根据系统设计及决策支持信息可视化的需要,道路运输安全管理 MDAS 必须具备大量监测数据和直观的结果表达方式,因此,系统的建立应该基于以下两个前提条件。

到稿日期:2011-11-14 返修日期:2012-01-17 本文受教育部高等学校博士点基金(20090191110022)资助。

孙棣华(1962—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究领域为智能交通系统、计算机控制系统、计算机管理与控制, E-mail: d3sun@163.com; 唐亮(1975—),男,博士生,主要研究领域为智能交通。

(1)必须有一定数量的、装有GPS定位装置的运营车辆行驶在道路上,同时能够向监控中心传回行驶过程中的状态信息。

目前全国的道路运输管理部门及运输企业逐步为辖区的运营车辆安装了GPS车载终端,并采用信息化技术手段,实现了对各大中型运输企业所管辖的营运车辆基础数据的管理及运行状况的实时数据采集。

(2)以GIS技术支持分析结果的表达,必须具有研究路网的高精度电子地图,以实现系统早期数据的处理和分析结果的直观显示。

经过多年的努力,我国电子地图的制作技术和精度有了长足的进展,在电子地图市场可以获得比例和精度满足需要的电子地图。

## 2.2 道路运输安全管理对MDAS的功能需求

针对当前运管职能部门安全工作中最为关切的问题及车载GPS能够记录的数据信息情况,经过调研、分析、总结,当前道路运输安全管理MDAS需求主要集中在以下几个方面。

(1)运营车辆超速的时间域分析。能够给出一年内的不同月份、季度的车辆违章对比图,运营车辆在一天24个时段内,违章的分布规律、趋势曲线,全面分析在时间域上的超速情况。

(2)运营车辆超速的空间域分析。包括不同道路的运营车辆超速的分析对比报表,同一条道路不同路段上不同行驶方向的超速情况分布图、曲线、趋势,对于一条道路上不同段上的超速分布,利用GIS直观呈现。

(3)运营车辆超速的人员分析。从“以人为本”的管理角度出发,分析不同类型的驾驶员的车辆超速情况,以在管理中做到有的放矢、针对性的培训或是教育处罚。

(4)运输企业的安全资信评价。在时间、空间上分析企业所辖车辆的超速情况,并将其作为评定企业运输安全资信的重要标准,使运输企业接受社会舆论的监督。

## 2.3 MDAS的全局网络拓扑结构

MDAS的全局网络拓扑结构如图1所示,分为数据采集、移动网关、总数据中心三大部分。MDAS完全利用现有的网络设备,架设在总数据中心数据库服务器之上,与GPS车辆监控系统共用一个监控数据源。

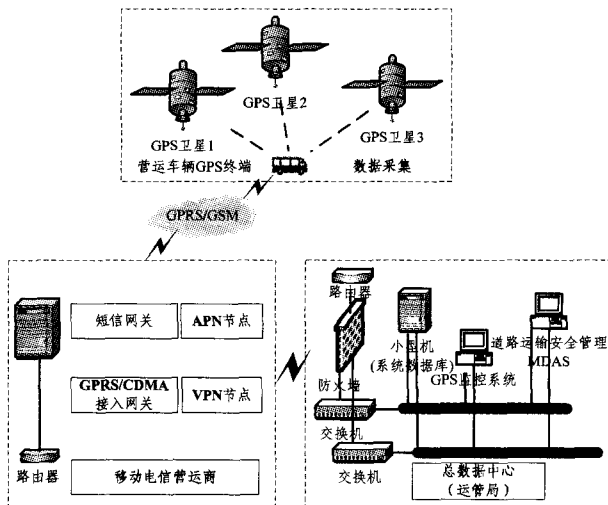


图1 MDAS的全局网络拓扑结构

图1显示了GPS数据的流动过程。GPS车载终端从卫

星信号中解析出自己的位置,利用GPRS/GSM网络将GPS信息(包括车辆ID、车辆经纬度、速度、角度、车辆状态等相关信息)以短信方式发送到电信运营商的移动数据通信网关。通信网关再通过数据专线将数据发送到运管部门总数据中心的小型机系统数据库中。MDAS从小型机数据库中定期抽取GPS数据,完成数据的分析处理任务。

## 2.4 MDAS的体系结构

MDAS是一种5层体系结构,如图2所示,包括基础数据层、数据抽取层、数据转化层、分析数据层、客户端软件层。基础数据层的各OLTP服务器主要存储由移动运营商通信网关传送过来的车辆报警、车辆运行的轨迹信息及各企业、车辆、人员及相关配置的静态信息。数据抽取层的作用是通过运管内部局域网将决策分析所需的各种数据迁移到分析服务器的数据缓冲表中,并且对数据进行初步的预处理。数据转化层实现GPS监控数据的分解,并联合车辆、企业、人员等基础信息生成符合数据仓库设计规范的格式化数据。分析数据层包括两个部分,其中数据仓库负责存储规范化和格式化处理的数据信息、视图、索引、跟踪数据的更新;审计和报告数据仓库的使用和状态等。OLAP数据服务器负责存储和创建多维数据集,及对多维数据集的维护及管理、更新元数据。客户端软件层主要利用PivotTable、Chart、GIS、VB界面等来实现分析结果的直观展现。

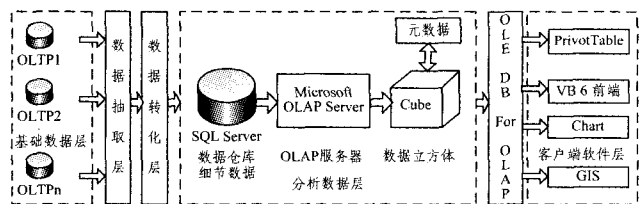


图2 MDAS体系结构图

## 3 道路运输安全管理MDAS关键技术

### 3.1 数据抽取器设计

道路运输安全管理MDAS作为职能部门决策支持的有机组成部分,其数据是由数据仓库统一调度和管理的,而GPS监控系统数据库是其主要数据来源。在数据仓库获得可分析的规范化数据之前,必须定期将数据从GPS系统数据库抽取到分析服务器上,并对数据进行转化使得它们可以为数据仓库所使用。

GPS监控系统通常需要使用和维护海量数据,为了使MDAS在运行过程中不对原数据库服务器产生过重的负载,必须约定一个恰当的时间点(如每月的1号凌晨0:00)定量地将决策分析所需的超速报警数据抽取出来,放在分析数据服务器上进行处理。MDAS数据抽取器设计采用的是DTS(Data Transformation Services,数据转换服务)+触发器模式,工作原理是DTS脚本运行在SQL Server中,当抽取时间开始时,自动调度导入操作任务,将系统所需的GPS监控数据通过网络抽取到分析服务器数据缓冲表中。触发器主要用于车辆、人员、企业等基础数据的维护,如业务需要基础数据发生变动,则自动运行触发器脚本,将数据自动更新到分析服务器中,从而保证数据的一致性。另外,MDAS数据抽取器具有异常处理机制,即当数据抽取进程由于异常导致中断,系统可以转入手动处理。

### 3.2 数据预处理

数据预处理是数据分析处理过程中非常重要的一环,质量高的预处理可以有效地提高 MDAS 的效率。运管职能部门积累的数据资源规模庞大、种类繁多,特别是运营车辆的监控数据高达上千万行甚至上亿行记录,如何有效地组织和预处理这些数据,是一个关键问题。本文将运管部门拥有的数据分为两大类即非空间特性数据和空间特性数据,根据二者的不同特性采用不同的预处理方法。

#### 3.2.1 非空间特性数据的预处理

在非空间特性数据预处理中,最主要的是小粒度数据的概化。所谓粒度是指数据综合程度高低的一个度量,既影响数据仓库中数据量的多少,也影响数据仓库所能回答询问的种类。由于数据仓库的主要作用是决策支持分析,因而绝大多数查询都基于一定程度的综合数据之上,只有少数查询涉及到细节。在道路运输安全管理 MDAS 中,需要概化的基础数据主要是驾驶员信息,如表 1、表 2 所列。其中,表 1 为原始驾驶员信息,表 2 为概化后的驾驶员信息。

表 1 原始驾驶员信息

驾驶员标号	驾驶员姓名	性别	年龄	驾龄	文凭
226	曾昭琪	男	47	23	高中
227	郑永仁	男	40	11	中专
228	周万明	男	35	8	初中
229	李贵明	男	45	20	初中

表 2 概化后的驾驶员信息

驾驶员标号	驾驶员姓名	性别	年龄段	熟练程度	文化程度
226	曾昭琪	男	中年	优秀	良好
227	郑永仁	男	中青年	好	良好
228	周万明	男	青年	较好	一般
229	李贵明	男	中年	优秀	一般

#### 3.2.2 空间特性数据预处理

对道路运输安全管理职能部门而言,很难从宏观上把握离散分布的超速定位点。因此,本文空间特性数据预处理的目的在于将离散的超速报警 GPS 定位点匹配到具体的路段、道路上,实现超速点-超速路段-超速道路的逐级映射,从而从宏观上逐级地观察超速的空间分布规律。由于 GPS 定位点存在定位误差,因此这种纠错与映射必须采用地图匹配技术来实现。地图匹配(Map-Matching, MM)是利用电子地图的路网信息和定位传感器获得的定位信息来确定车辆行驶的道路和其在道路上的准确位置,从而使系统定位性能得到改善。地图匹配算法的关键是确定车辆当前行驶的道路,道路运输安全管理 MDAS 采用基于最近点估计地图匹配算法<sup>[3]</sup>来实现这种确定,其推导过程如下。

设  $P_1$  和  $P_2$  代表道路节点,其坐标分别为  $(P_{1x}, P_{1y})$  和  $(P_{2x}, P_{2y})$ 。 $P_3$  代表 GPS 信号点,其坐标为  $(P_{3x}, P_{3y})$ 。 $P'_3$  代表 GPS 信号  $P_3$  在道路  $P_1P_2$  上的最近点估计位置点,其坐标为  $(P'_{3x}, P'_{3y})$ 。由 GIS 中可获得  $P_{1x}, P_{1y}, P_{2x}, P_{2y}$ , 而 GPS 信号自带了经纬度,也就是  $P_{3x}, P_{3y}$ 。现在的目标是求  $P'_{3x}, P'_{3y}$ 。

其斜率  $k$  为:

$$k = \frac{P_{2y} - P_{1y}}{P_{2x} - P_{1x}}$$

求出斜率  $k$  后,可由下述公式求得  $P'_{3x}, P'_{3y}$ :

$$P'_{3x} = \frac{k * (P_{3y} - P_{1y}) + (P_{3x} - P_{1x})}{k^2 + 1} + P_{1x}$$

$$P'_{3y} = k * \frac{k * (P_{3y} - P_{1y}) + (P_{3x} - P_{1x})}{k^2 + 1} + P_{1y}$$

求出  $P'_{3x}, P'_{3y}$  后,在电子地图上以  $P'_{3x}, P'_{3y}$  为坐标,即可显示实际运营车辆超速点在道路上的位置。

上述算法由于计算量小、系统负载小、系统处理时间不会过长,因此能够很好地满足数据仓库环境下对数据处理时间的要求。

### 3.3 MDAS 数据仓库模型设计

根据道路运输安全管理 MDAS 的需求,以营运车辆超速分析为主题来组织数据仓库,在此基础上实现营运车辆超速的多维分析,以此辅助运管职能部门决策者制定安全管理决策。MDAS 采用雪花模型作为数据仓库的逻辑模型,这种模型包括事实表和维表两种类型的表。事实表主要包括超速报警标识号、日期编码、位置编码、车辆编码、驾驶员编码、超速次数(度量值)。此外为了查询细节数据的便利,事实表中增加了经度、纬度、日期、速度 4 个字段。这 4 个字段只作为查询细节数据之用,不能聚合。维表包括时间维、位置维、驾驶员维、车辆维,各维的属性值具体见图 3。

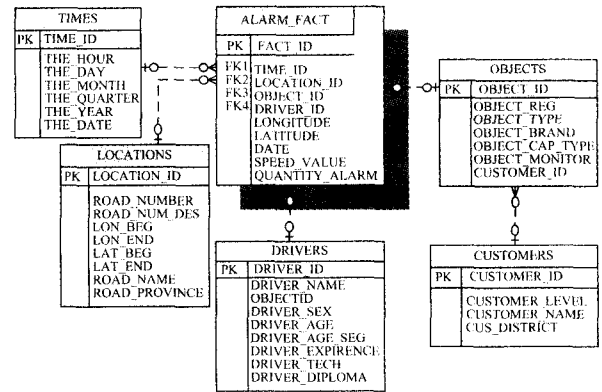


图 3 MDAS 数据仓库模型

### 3.4 MDAS 数据集设计

在设计 MDA 数据集时,最关键的是 Cube 和维度的设计,系统使用 MS Analysis Services 来创建和维护 Cube 和维度。为了支持增量更新处理,系统维度采用的是常规共享维度。Cube 采用的是常规立方,常规立方是基于该立方分区数据源中所指定的数据库中的表,一个常规立方必须至少包含一个分区,有聚合,需要存储空间进行存储。其它 3 种立方分别为虚拟立方、链接立方和本地立方,不包含分区,也没有聚合,因此不适应本系统的需要。另外,对于 Cube 更新,系统根据实际情况采用增量更新、刷新数据或者完全处理。

### 3.5 MDAS 引擎设计

#### 3.5.1 MDX

MDX (Multi-Dimension Expression, 多维表达式)是一种支持多维对象和数据定义操作的语法<sup>[4]</sup>。MDX 在很多方面与 SQL(结构化查询语言)语法相似,但不是 SQL 的简单扩展。MDX 能够提供丰富而强大的、用于查询多维数据集的语法。

#### 3.5.2 MDAS 引擎设计

本文设计的 MDAS 引擎是一种基于 MDX 的数据分析引擎,它工作于分析数据层和客户端软件层之间,是二者进行数据交互的桥梁。其主要功能是分析用户的查询操作,即将

查询操作解释为 MDX,通过 ADO MD 连接 Cube,并对 Cube 进行各种操作,最终把查询的多维结果集返回给客户端。

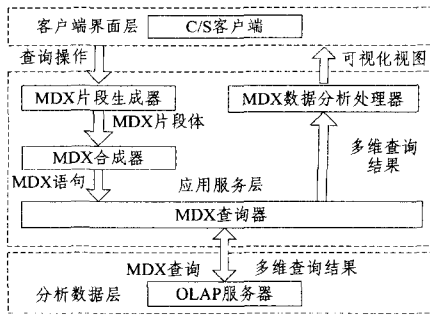


图 4 MDA 引擎

工作流程见图 4:首先 C/S 客户端用户通过应用程序界面发起查询操作。MDX 片段生成器接收其操作请求,并生成与之对应的 MDX 片段体。当用户查询操作完成时,MDX 合

成器将所有片段体合成一条标准的 MDX 语句,并送交 MDX 查询器。MDX 查询器通过 ADO MD 访问 OLAP 服务器的数据立方体,OLAP 服务器将多维查询结果返回给 MDX 查询器。MDX 查询器将多维数据结果传送给 MDX 数据分析处理器,并生成可视化视图呈现给 C/S 客户端。

MDAS 引擎具有模块化、松耦合、响应速度快的特点,能够快速实现数据与用户的交互。

#### 4 道路运输安全管理 MDAS 应用实现

根据上述设计,以重庆市“两客一危”GPS 监控系统存储的营运车辆超速报警数据,以及从业人员、运营车辆、运输企业等基础数据作为分析对象,以运营车辆超速分析为主题,开发了重庆市道路运输安全管理 MDAS。

系统研究的路网为重庆市高速公路网,部分高速公路的分段信息如表 3 所列。

表 3 研究道路的部分分段信息

路段标号	路段起始位置	起始经度	终止经度	起始纬度	终止纬度	高速公路
1	大佛寺大桥-丁家院子大桥	106.562323	106.595995	29.613871	29.557728	渝黔高速
2	丁家院子大桥-百步梯大桥	106.595995	106.616769	29.557728	29.504264	渝黔高速
3	百步梯大桥-吉庆隧道	106.616769	106.592584	29.504264	29.391266	渝黔高速
1	起始点-李子林隧道	106.621408	106.672702	29.634441	29.729269	渝邻高速
2	李子林隧道-梅花二号桥	106.672702	106.726163	29.729269	29.806083	渝邻高速
3	梅花二号桥-温塘河大桥	106.726163	106.781247	29.806083	29.899548	渝邻高速

系统数据处理流程步骤如下:

步骤 1 正式开始加载作业之前的准备工作。包括源数据、目标数据的定义,数据映像、批作业的定义。

步骤 2 启动数据处理的批作业。

步骤 3 加载所有的维表。因为维表持有事实表参照的主键,所以必须先完成对维表的加载。加载时间维表时,首先要考虑时间维表是否需要更新,若需要,则先更新再加载。

步骤 4 处理批作业。加载位于数据缓冲区的批作业,从加载的维表中拾取对应的主键作为事实表的外键,完成事实数据的生成。

步骤 5 在批作业处理完成之后,对数据立方体进行刷新,以保障数据立方体与数据仓库数据的同步,同时将作业控制过程及出错信息写入日志。

作为系统实际运行的示例,图 5 显示的是采用数据透视表组件实现的 MDAS,通过界面左边浮动窗口可以任意拖拽不同的维度成员到界面右边的组件中,实现多维度的组合分析。图 6 显示的是采用 Chart 组件实现的可视化多维视图分析界面。图 7 显示的是多参数趋势分析界面。图 8 显示的是采用电子地图实现的不同高速公路、不同路段的数据分析界面。

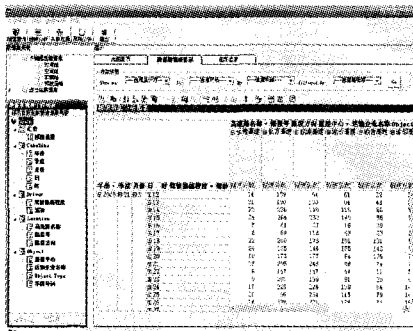


图 5 PivotTable 组件多维数据分析界面

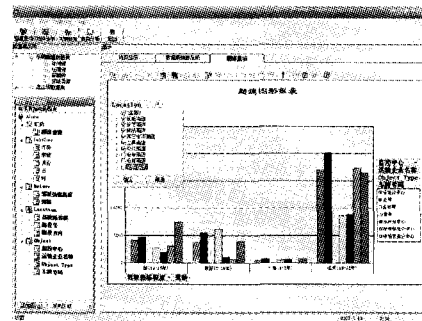


图 6 Chart 组件多维数据分析界面

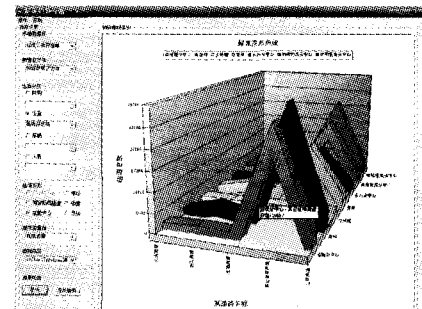


图 7 多参数趋势分析界面

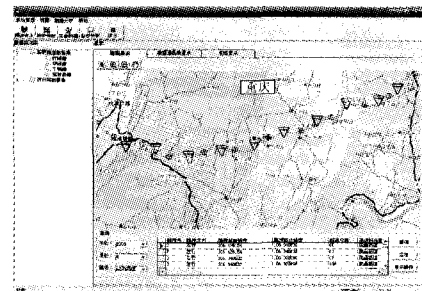


图 8 电子地图分析界面

**结束语** 从实际的道路运输安全管理决策支持需求出发,在对现有的基础和应用条件分析的基础上,提出了道路运输安全管理 MDAS 的总体解决方案,包括系统的全局网络拓扑结构和系统体系结构,并深入地研究了其中涉及的关键技术。以此技术为基础,开发完成了重庆市道路运输安全管理 MDAS,并将其应用于重庆市的道路运输安全管理决策支持工作中。实际运行表明:设计的系统能够实现时间、空间、车辆、人员、企业多种维度的营运车辆超速报警综合分析,能够满足实际决策支持工作的需要。

### 参考文献

[1] Recker W W. The California Advanced Transportation Man-

agement Systems Testbed [C]//WESCON'93. Conference Record, 1993; 273-278

[2] Ossowski S, Fernandez A, Serrano J M. Designing Multi-agent Decision Support System-The Case of Transportation Management [C]//Proceedings of the Third International Joint Conference on Autonomous Agents and Multi-agent Systems, 2004; 1470-1471

[3] 孙棣华,张星霞,张志良. 地图匹配算法及其在智能交通系统中的应用[J]. 计算机工程与应用, 2005, 41(20): 225-228

[4] Liu Wen-yuan, Fang Shu-fen. OLAP Realization technology Research Based on MDX [C]// Proceedings International Conference on. Machine Learning and Cybernetics, 2002, 4: 2205-2209

(上接第 207 页)

若  $n$  为测试样本总数,称其为宏平均  $F_1$  值(MAAF);若  $n$  为兼类数相同的样本数,称其为微平均  $F_1$  值(MIAF)。

实验中,对超球和超椭圆两种方法进行实验分析。实验环境为 Pentium 1.6G,内存 512M,操作系统 Windows XP。使用的核函数为径向基函数(Radial Basis Function, RBF)  $K(x, y) = e^{-\gamma \|x-y\|^2}$ , 其中  $\gamma=0.01$ , 系统参数  $v=0.6$ 。

表 2 给出了在初始数据集和每次增量学习后的宏平均准确率、宏平均召回率和宏平均  $F_1$  值。表 3 给出了在初始数据集和每次增量后的训练时间以及分类时间。

表 2 两种算法的宏平均准确率、宏平均召回率和宏平均  $F_1$  值比较

学习过程	算法	MAAP	MAAR	MAAF
初始样本集	超球算法	91.51	91.04	90.57
	超椭圆算法	92.16	91.78	91.93
第 1 次增量	超球算法	81.32	78.68	79.02
	超椭圆算法	83.25	80.06	81.33
第 2 次增量	超球算法	79.21	78.24	78.77
	超椭圆算法	82.75	79.48	80.99
第 3 次增量	超球算法	78.38	77.92	77.52
	超椭圆算法	80.88	78.82	79.62

表 3 两种算法的训练时间和分类时间比较

学习过程	算法	训练时间(ms)	分类时间(ms)
初始样本集	超球算法	110	58
	超椭圆算法	127	46
第 1 次增量	超球算法	94	114
	超椭圆算法	112	77
第 2 次增量	超球算法	16	122
	超椭圆算法	24	81
第 3 次增量	超球算法	15	139
	超椭圆算法	21	101

从实验结果可以看出,超椭圆方法的准确率和召回率高于超球方法。其主要原因是样本在特征空间不是规整地呈超球型分布,而是呈带状的、凸的且各向异性的超立方体或超椭圆型分布,用超椭圆包围的空间小于用超球包围的空间,从而提高了其分类精度。超椭圆方法较超球方法提高了分类速度,其主要原因是每次分类时,超椭圆方法的分类器中只涉及一个样本(待分类样本),而超球方法的分类器涉及多个样本(所有支持向量)。但超椭圆方法的训练速度比超球方法略慢,这是因为增量学习时,新增样本以及新增样本中兼有的历史类样本都参加训练,同时需要进行坐标变换,其维数越高,计算量越大。另外,优化缩放因子也要花费一定的时间。

**结束语** 本文提出了一种基于超椭圆的兼类样本类增量学习算法,描述了最小包围椭圆的构造和相应的类增量学习

算法,并与超球方法作了比较。在标准数据集 Reuters 21578 上的实验结果表明,该方法在分类精度和分类速度上都优于超球方法。进一步的研究工作是引入核函数理论,并在规模较大、兼类数较多的数据集上进行试验。

### 参考文献

[1] Li Y. On incremental and robust subspace learning[J]. Pattern Recognition, 2004, 37(7): 1509-1518

[2] Lam W, Keung C K, Liu D. Discovering useful concept prototypes for classification based on filtering and abstraction[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2002, 24(8): 1075-1090

[3] Gangardiwala A, Polikar R. Dynamically weighted majority voting for incremental learning and comparison of three boosting based approaches [C]// Proceedings of the IEEE International Joint Conference on Neural Networks, Montreal, Canada, 2005; 1131-1136

[4] Cauwenberghs G, Poggio T. Incremental and decremental support vector machine[J]. Machine Learning, 2001, 44(13): 409-415

[5] Zhang J P, Li Z W, Yang J. A divisional incremental training algorithm of support vector machine [C]// Proceeding of the IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. Niagara Falls, Canada, 2005; 853-855

[6] Diehl C, Cauwenberghs G. SVM incremental learning, adaptation and optimization [C]// Proceedings of the International Joint Conference on Neural Networks, 2003; 2685-2690

[7] 孔锐,张冰. 一种快速支持向量机增量学习算法[J]. 控制与决策, 2005, 20(10): 1129-1132

[8] 萧嵘,王继成,孙正兴,等. 一种 SVM 增量学习算法  $\alpha$ -ISVM [J]. 软件学报, 2001, 12(12): 1818-1824

[9] Zhang B F, Su J S, Xu X. A class-incremental learning method for multi-class support vector machines in text classification [C]// Proceedings of the Fifth International Conference on Machine Learning and Cybernetics. Dalian, China, 2006; 13-16

[10] 秦玉平,李祥纳,王秀坤,等. 基于超球支持向量机的类增量学习算法研究[J]. 计算机科学, 2008, 35(18): 116-118

[11] 秦玉平,王秀坤,王春立. 实现兼类样本类增量学习的一种算法 [J]. 控制与决策, 2009, 24(1): 137-140

[12] 高俊祥,杜海清,刘勇. 采用光照不变特征的椭圆法运动阴影检测[J]. 北京邮电大学学报, 2009, 32(5): 109-113

[13] Shigeo A, Ruck T. A fuzzy classifier with ellipsoidal regions [J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 1997, 5(3): 358-368

[14] 刘勇,赵斌,夏绍玮. 模糊超椭圆分类算法及其在无约束手写体数字识别中的应用[J]. 清华大学学报, 2000, 40(9): 120-124