(19)中华人民共和国国家知识产权局

(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 105206115 A
(43)申请公布日 2015.12.30

(21)申请号 201510641259.9

(22)申请日 2015.09.30

(71)申请人 中国民用航空总局第二研究所
地址 610041 四川省成都市二环路南二段17号

(72)发明人 张建平 刘卫东 刘丹 张力员

(74)专利代理机构 北京酷爱智慧知识产权代理有限公司 11514
代理人 殷瑞剑

(51)Int.Cl.
G08G 5/00(2006.01)

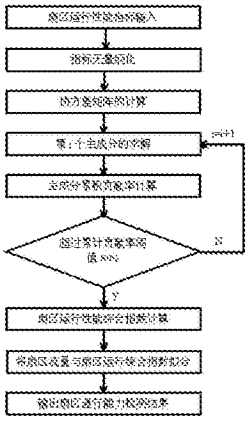
权利要求书3页 说明书10页 附图2页

(54)发明名称

一种基于主成分分析的空中交通管制扇区通行能力检测方法

(57)摘要

本发明涉及一种基于主成分分析的空中交通管制扇区通行能力检测方法，其包括以下步骤：(1)选取变量；(2)数据处理；(3)主成分的确定；(4)扇区运行性能综合指数的计算；(5)扇区通行能力检测。本发明基于实时运行数据的可采集性，构建了具有完备性、普适性的扇区运行性能定量指标体系。对影响扇区运行性能的各维度指标，进行全面、综合考虑，提出了基于多属性决策的扇区通行能力检测新方法，相比于传统的扇区通行能力检测方法更加全面、科学、准确。



CN 105206115 A

1. 一种基于主成分分析的空中交通管制扇区通行能力检测方法，其特征在于，具体步骤如下：

步骤 1：采集各时间片段的扇区流量数据及扇区运行性能数据，扇区运行性能数据包括扇区通行性指标、扇区复杂性指标、扇区安全性指标、扇区经济性指标和管制员工作负荷指标；

步骤 2：通过主成分分析，计算得出各时间片段的扇区运行性能综合指数；

步骤 3：基于扇区流量数据和扇区运行性能综合指数，得到傅里叶函数拟合式；

步骤 4：根据傅里叶函数拟合式，获得扇区运行性能综合指数高位区间所对应的扇区流量作为扇区通行能力检测结果。

2. 根据权利要求 1 所述的基于主成分分析的空中交通管制扇区通行能力检测方法，其特征在于，扇区通行性指标分别为扇区航行里程、扇区航行时间。

3. 根据权利要求 1 所述的基于主成分分析的空中交通管制扇区通行能力检测方法，其特征在于，扇区复杂性指标分别为扇区航空器爬升次数、扇区航空器下降次数、扇区航空器改速次数、扇区航空器改航次数。

4. 根据权利要求 1 所述的基于主成分分析的空中交通管制扇区通行能力检测方法，其特征在于，扇区安全性指标分别为扇区短期冲突告警频率和扇区最低安全高度告警频率。

5. 根据权利要求 1 所述的基于主成分分析的空中交通管制扇区通行能力检测方法，其特征在于，扇区经济性指标分别为扇区排队长度、扇区航空器延误架次率、扇区航空器延误时间、扇区航空器平均延误时间。

6. 根据权利要求 1 所述的基于主成分分析的空中交通管制扇区通行能力检测方法，其特征在于，管制员工作负荷指标分别为陆空通话信道占用率、陆空通话次数。

7. 根据权利要求 1 所述的基于主成分分析的空中交通管制扇区通行能力检测方法，其特征在于，所述步骤 2 包括如下步骤：

步骤 2.1：选取变量

以扇区运行性能综合指数为因变量，扇区运行性能指标共计 14 项，记自变量 x 为：

$$x = \{x_j, j = 1, 2 \cdots 14\} \quad (1)$$

其中，扇区通行性指标为 $\{x_1, x_2\}$，扇区复杂性指标为 $\{x_3, x_4, x_5, x_6\}$，扇区安全性指标为 $\{x_7, x_8\}$，扇区经济性指标为 $\{x_9, x_{10}, x_{11}, x_{12}\}$，管制员工作负荷指标为 $\{x_{13}, x_{14}\}$；

以一定时间片段长度，采集扇区运行性能指标数据，组成指标样本集；

该样本集中，时间片段的数量为 n，即样本的数量为 n，其中 n>14，扇区运行性能指标数量为 14 个，构建 n×14 的指标矩阵 X，即：

$$X = \begin{bmatrix} x_{1,1} & x_{1,2} & \cdots & x_{1,14} \\ x_{2,1} & x_{2,2} & \cdots & x_{2,14} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ x_{n,1} & x_{n,2} & \cdots & x_{n,14} \end{bmatrix} \quad (2)$$

步骤 2.2：数据处理

令第 i 个时间片段的第 j 项指标的实际值为 $x_{i,j}$，$\overline{x_j}$ 为第 j 项指标 x_j 的均值：

$$\overline{x_j}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}x_{i,j} \qquad (3)$$

s_j为第 j 项指标 x_j的标准差：

$$s_j=\sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(x_{i,j}-\overline{x_j})^2} \qquad (4)$$

$y_{i,j}$为第 i 个时间片段无量纲化处理后的第 j 项指标值，扇区运行性能指标分为两类，第一类为正向指标，即值越大越好的指标，第二类为逆向指标，即值越小越好的指标；对于正向指标：

$$y_{i,j}=\frac{x_{i,j}-\overline{x}_j}{s_j} \qquad (5)$$

对于逆向指标，先取其倒数或取负获得正向化过渡指标 $X_j'=(x_{1,j}',x_{2,j}',\ldots,x_{n,j}')^T$ 及其均值$\overline{x_j}'$、标准差 s_j'，再进行无量纲化处理，即：

$$x_{i,j}'=\frac{1}{x_{i,j}} \text{ 或 } x_{i,j}'=-x_{i,j} \qquad (6)$$

$$y_{i,j}=\frac{x_{i,j}'-\overline{x}_j'}{s_j'} \qquad (7)$$

步骤 2.3：主成分的确定

无量纲化处理后，14 个指标的协方差矩阵就是相关系数矩阵，计算相关系数矩阵的特征值 λ_j，并按从小到大排序，根据第 j 大特征值 λ_j所对应的特征向量 $\varepsilon_j=(\varepsilon_{j,1},\varepsilon_{j,2},\ldots,\varepsilon_{j,14})^T$就可以确定指标矩阵 X 的第 j 个主成分；对于样本集中第 i 个时间片段的样本指标数据，第 j 个主成分为：

$$Y_{i,j}=\varepsilon_{j,1}y_{i,1}+\varepsilon_{j,2}y_{i,2}+\ldots+\varepsilon_{j,14}y_{i,14},\ j=1,2,\ldots,14 \qquad (8)$$

第 j 个主成分的贡献率为：

$$w_j=\frac{\lambda_j}{\sum_{j=1}^{14}\lambda_j} \qquad (9)$$

取 m 个主成分，使累计贡献率达到 80％以上：

$$\sum_{j=1}^{m}w_j\geq 0.80 \qquad (10)$$

其中，m 是指主成分累计贡献率达到 80％以上时对应的主成分个数；

步骤 2.4：扇区运行性能综合指数的计算

对于样本集中第 i 个时间片段的样本指标数据，结合计算得到的主成分及其贡献率可计算出扇区运行性能综合指数为：

$$E_i=\sum_{j=1}^{m}w_jY_{i,j} \qquad (11)$$

在公式 (3)-(11) 中，i 为样本序号，取值为 1 到 n，j 为指标序号，取值为 1 到 14。

8. 根据权利要求 1-6 任一项所述的基于主成分分析的空中交通管制扇区通行能力检测方法，其特征在于，步骤 1 中的时间片段长度可自定义为 15 分钟、30 分钟或 1 小时。

9. 根据权利要求 1 所述的基于主成分分析的空中交通管制扇区通行能力检测方法，其特征在于，步骤 2.2 中的正向指标包括扇区通行性指标和管制员工作负荷指标。

10. 根据权利要求 1 所述的基于主成分分析的空中交通管制扇区通行能力检测方法，其特征在于，步骤 2.2 中的逆向指标包括扇区复杂性指标、扇区安全性指标和扇区经济性指标。

一种基于主成分分析的空中交通管制扇区通行能力检测方法

技术领域

[0001] 本发明涉及一种空中交通流量管理方法，具体涉及一种基于主成分分析的空中交通管制扇区通行能力检测方法。

背景技术

[0002] 空中交通管制扇区（简称“扇区”）是空中交通管制（简称“管制”）的基本空间单元。一般情况下，为航空器提供空中交通管制服务的空域被划设为若干扇区，每个扇区对应一个空中交通管制员（简称“管制员”）工作席位。扇区通行能力是反映空域性能的重要指标，通常以扇区内单位时间所能够通过的航空器最大数量来测计，科学检测扇区通行能力是实施空中交通流量管理的前提和依据。

[0003] 以国际民航组织推荐的DORATASK法、MBB法，以及欧洲空管实验中心提出的RAMS法为典型代表，目前的扇区通行能力检测主要采取将管制员工作负荷约束转化为扇区交通流量约束予以解决。如陈薇宇、胡明华发表的“基于管制员工作负荷的航路扇区容量评估技术”（哈尔滨商业大学学报自然科学版，第26卷第6期，2010年12月），通过分析航路扇区中雷达管制模式下管制员工作负荷，提出了管制员工作负荷模型对管制员工作负荷进行量化，在此基础上，采用回归分析法和有效时间段法两种方法，分析了管制员工作负荷与航路扇区容量的关系，从而得出航路扇区容量值。以及吴开明发表的“空中交通流量管理中的扇区容量评估研究”（华南理工大学工程硕士学位论文，2013年）和CN102842075A（申请公布日2012年12月26日）均是将扇区管制员工作负荷按照能否直接观察进行分类，并以时间度量方式对管制员工作负荷进行定量评估，当管制员工作负荷达到规定阈值时所对应的扇区交通流量即为扇区通行能力。

[0004] 实际上，影响扇区通行能力的因素众多，扇区通行能力是扇区内诸多运行性能要素综合优化下的反映，属于多属性决策问题，而目前的扇区通行能力检测方法存在片面性。

发明内容

[0005] 本发明所要解决的技术问题是：提供一种基于主成分分析的空中交通管制扇区通行能力检测方法，提高了空中交通管制扇区通行能力检测的全面性和准确性。

[0006] 本发明的技术方案是：一种基于主成分分析的空中交通管制扇区通行能力检测方法，具体步骤如下：

[0007] 步骤1：采集各时间片段的扇区流量数据及扇区运行性能数据，扇区运行性能数据包括扇区通行性指标、扇区复杂性指标、扇区安全性指标、扇区经济性指标和管制员工作负荷指标；

[0008] 步骤2：通过主成分分析，计算得出各时间片段的扇区运行性能综合指数；

[0009] 步骤3：基于扇区流量数据和扇区运行性能综合指数，得到傅里叶函数拟合式；

[0010] 步骤4：根据傅里叶函数拟合式，获得扇区运行性能综合指数高位区间所对应的

扇区流量作为扇区通行能力检测结果。

[0011] 其中，扇区通行性指标分别为扇区航行里程、扇区航行时间。扇区复杂性指标分别为扇区航空器爬升次数、扇区航空器下降次数、扇区航空器改速次数、扇区航空器改航次数。扇区安全性指标分别为扇区短期冲突告警频率和扇区最低安全高度告警频率。扇区经济性指标分别为扇区排队长度、扇区航空器延误架次率、扇区航空器延误时间、扇区航空器平均延误时间。管制员工作负荷指标分别为陆空通话信道占用率、陆空通话次数。

[0012] 优选的，步骤 2 包括如下步骤：

[0013] 步骤 2.1：选取变量

[0014] 以扇区运行性能综合指数为因变量，扇区运行性能指标共计 14 项，记自变量 x 为：

[0015] $x = \{x_j, j = 1, 2\cdots 14\}$ (1)

[0016] 其中，扇区通行性指标为 $\{x_1, x_2\}$，扇区复杂性指标为 $\{x_3, x_4, x_5, x_6\}$，扇区安全性指标为 $\{x_7, x_8\}$，扇区经济性指标为 $\{x_9, x_{10}, x_{11}, x_{12}\}$，管制员工作负荷指标为 $\{x_{13}, x_{14}\}$；

[0017] 以 1 小时作为时间片段长度，采集扇区运行性能指标数据，组成指标样本集；

[0018] 该样本集中，时间片段的数量为 n，即样本的数量为 n，其中 n>14，扇区运行性能指标数量为 14 个，构建 n×14 的指标矩阵 X，即：

[0019] $$X=\begin{bmatrix} x_{1,1} & x_{1,2} & \cdots & x_{1,14} \\ x_{2,1} & x_{2,2} & \cdots & x_{2,14} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ x_{n,1} & x_{n,2} & \cdots & x_{n,14} \end{bmatrix} \quad (2)$$

[0020] 步骤 2.2：数据处理

[0021] 令第 i 个时间片段的第 j 项指标的实际值为 $x_{i,j}$，$\overline{x_j}$ 为第 j 项指标 x_j 的均值：

[0022] $$\overline{x_j}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}x_{i,j} \quad (3)$$

[0023] s_j 为第 j 项指标 x_j 的标准差：

[0024] $$s_j=\sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(x_{i,j}-\overline{x_j})^2} \quad (4)$$

[0025] $y_{i,j}$ 为第 i 个时间片段无量纲化处理后的第 j 项指标值，扇区运行性能指标分为两类，第一类为正向指标，即值越大越好的指标，第二类为逆向指标，即值越小越好的指标；对于正向指标：

[0026] $$y_{i,j}=\frac{x_{i,j}-\overline{x}_j}{s_j} \quad (5)$$

[0027] 对于逆向指标，先取其倒数或取负获得正向化过渡指标 $X_j' = (x_{1,j}', x_{2,j}', \ldots, x_{n,j}')^T$ 及其均值 $\overline{x}_j'$、标准差 s_j'，再进行无量纲化处理，即：

[0028] $$x_{i,j}'=\frac{1}{x_{i,j}} \text{ 或 } x_{i,j}' = -x_{i,j} \quad (6)$$

[0029] $$y_{i,j}=\frac{x_{i,j}'-\overline{x_j}'}{s_j'} \qquad (7)$$

[0030] 步骤 2.3：主成分的确定

[0031] 无量纲化处理后，14 个指标的协方差矩阵就是相关系数矩阵，计算相关系数矩阵的特征值 λ_j，并按从小到大排序，根据第 j 大特征值 λ_j所对应的特征向量 $\varepsilon_j=(\varepsilon_{j,1},\varepsilon_{j,2},\ldots,\varepsilon_{j,14})^T$就可以确定指标矩阵 X 的第 j 个主成分；对于样本集中第 i 个时间片段的样本指标数据，第 j 个主成分为：

[0032] $$Y_{i,j}=\varepsilon_{j,1}y_{i,1}+\varepsilon_{j,2}y_{i,2}+\ldots+\varepsilon_{j,14}y_{i,14},\ j=1,2,\ldots,14 \qquad (8)$$

[0033] 第 j 个主成分的贡献率为：

[0034] $$w_j=\frac{\lambda_j}{\sum_{j=1}^{14}\lambda_j} \qquad (9)$$

[0035] 取 m 个主成分，使累计贡献率达到 80％以上：

[0036] $$\sum_{j=1}^{m}w_j\geq 0.80 \qquad (10)$$

[0037] 其中，m 是指主成分累计贡献率达到 80％以上时对应的主成分个数；

[0038] 步骤 2.4：扇区运行性能综合指数的计算

[0039] 对于样本集中第 i 个时间片段的样本指标数据，结合计算得到的主成分及其贡献率可计算出扇区运行性能综合指数为：

[0040] $$E_i=\sum_{j=1}^{m}w_jY_{i,j} \qquad (11)$$

[0041] 在公式 (3)-(11) 中，i 为样本序号，取值为 1 到 n，j 为指标序号，取值为 1 到 14。

[0042] 进一步地，步骤 1 中的时间片段长度可自定义为 15 分钟、30 分钟或 1 个小时。

[0043] 进一步地，步骤 2.2 中的正向指标包括扇区通行性指标和管制员工作负荷指标。

[0044] 进一步地，步骤 2.2 中的逆向指标包括扇区复杂性指标、扇区安全性指标和扇区经济性指标。

[0045] 本发明与现有技术相比的优点在于：

[0046] 本发明基于实时运行数据的可采集性，构建了具有完备性、普适性的扇区运行性能定量指标体系。对影响扇区运行性能的各维度指标，进行全面、综合考虑，提出了基于多属性决策的主成分分析的扇区通行能力检测新方法，相比于传统的扇区通行能力检测方法更加全面、科学、准确。

附图说明

[0047] 图 1 为本发明扇区通行能力检测的流程图。

[0048] 图 2 为本发明扇区运行性能综合指数示意图。

[0049] 图 3 为本发明扇区流量与扇区运行性能综合指数拟合图。

具体实施方式

[0050] 本发明从空管自动化系统、转报系统、VHF 通信系统中采集综合航迹、飞行计划、语音通信等实时运行数据，以国际民航组织（简称为“ICAO”）、美国联邦航空局 (FAA) 相关文件为参考，建立扇区运行性能定量指标体系并实现指标检测。

[0051] (1) 综合航迹采集

[0052] 空管自动化系统对航管一、二次雷达等监视信号进行数据融合和数据处理，输出综合航迹信息。从空管自动化系统采集综合航迹数据，通过网络的方式进行传输。数据采集服务器对采集的综合航迹数据进行解析，获取航空器的高度、速度、位置等信息用于指标的计算。

[0053] (2) 语音数据采集

[0054] 管制员与飞行员通过 VHF 通信系统实现陆空语音通话。该系统由甚高频 (Very High Frequency，VHF) 收发电台及信号传输、处理装置组成。语音数据采集从配线架上并接采集语音信号，将陆空通话信息进行解码和存储，用于管制员管制指挥通话负荷的分析。

[0055] 语音信号从配线架上高阻抗（录音模块为 200K 欧姆）采集（管制员地空通话）席位语音，不影响地空通话和语音记录，采用多对电缆线将语音信号从配线架引接至语音处理器，实现对多个席位语音的采集和分析。

[0056] (3) 电报数据采集

[0057] 转报系统是收发民用航空飞行动态固定电报的枢纽装置，民用航空飞行动态固定电报的报文由若干个规定的数据编组按固定顺序排列而成。引接转报系统输出的电报数据，并对数据进行格式转换、解析和存储，获取飞行计划数据。

[0058] 所采集的实时运行数据包括扇区流量数据及扇区运行性能数据。

[0059] 扇区流量是指管制扇区单位时间内所管辖的航空器架次。通过引接空管自动化系统综合航迹数据获取空中航空器的位置信息，结合已配置的扇区边界信息，计算得到扇区流量。

[0060] 扇区运行性能定量指标体系主要内容有：扇区通行性指标，包括扇区流量、扇区航行里程、扇区航行时间；扇区复杂性指标，包括扇区航空器爬升次数、扇区航空器下降次数、扇区航空器改速次数、扇区航空器改航次数；扇区安全性指标，包括扇区短期冲突告警 (STCA，Short-term conflict alert) 频率、扇区最低安全高度告警 (MSAW，Minimum safe altitude warning) 频率；扇区经济性指标，包括扇区排队长度、扇区航空器延误架次率、扇区航空器延误时间、扇区航空器平均延误时间；管制员工作负荷指标，包括陆空通话信道占用率、陆空通话次数。

[0061] (1) 扇区通行性指标检测

[0062] 1.1 扇区航行里程检测

[0063] 扇区航行里程是指管制扇区单位时间内所管辖的航空器航行里程的总和。设管制扇区单位时间内航空器架次数为 Q，第 q 架航空器的航行里程为 M_q，扇区航行里程为 M_{total}，则 $M_{total}=\sum_{q=1}^{Q}M_q$。通过引接空管自动化系统综合航迹数据获取空中航空器的位置信息，结合已配置的扇区边界信息，计算得到扇区航行里程。

[0064] 1.2 扇区航行时间检测

[0065] 扇区航行时间是指管制扇区单位时间内所管辖的航空器航行时间的总和。设管制

扇区单位时间内航空器架次数为Q，第q架航空器的航行时间为T_q，扇区航行时间为T_{total}，则$T_{total}=\sum_{q=1}^{Q}T_q$。通过引接空管自动化系统综合航迹数据获取空中航空器的位置信息，结合已配置的扇区边界信息，计算得到扇区航行时间。

[0066] (2) 扇区复杂性指标检测

[0067] 2.1 扇区航空器爬升次数检测

[0068] 扇区航空器爬升次数是指管制扇区单位时间内所管辖的航空器爬升次数的总和。设管制扇区单位时间内航空器架次数为Q，第q架航空器的爬升次数为C_q，扇区航空器爬升次数为C_{total}，则$C_{total}=\sum_{q=1}^{Q}C_q$。引接实时综合航迹数据，对扇区中航空器的爬升情况进行监视与统计，一个航空器爬升一个高度层为爬升一次，计算得到扇区航空器爬升次数。

[0069] 2.2 扇区航空器下降次数检测

[0070] 扇区航空器下降次数是指管制扇区单位时间内航空器下降次数的总和。设管制扇区单位时间内航空器架次数为Q，第q架航空器的下降次数为D_q，扇区航空器下降次数为D_{total}，则$D_{total}=\sum_{q=1}^{Q}D_q$。引接实时综合航迹数据，对扇区中航空器的下降情况进行监视与统计，一个航空器下降一个高度层为下降一次，计算得到扇区航空器爬升次数。

[0071] 2.3 扇区航空器改速次数检测

[0072] 扇区航空器改速次数是指管制扇区单位时间内航空器速度改变次数的总和。设管制扇区单位时间内航空器架次数为Q，第q架航空器的改速次数为S_q，扇区航空器改速次数为S_{total}，则$S_{total}=\sum_{q=1}^{Q}S_q$。引接实时综合航迹数据，对扇区中航空器的速度改变情况进行监视与统计，一个航空器速度连续改变达到设定参数为一次速度改变，计算得到扇区航空器改速次数。

[0073] 2.4 扇区航空器改航次数检测

[0074] 扇区航空器改航次数是指管制扇区单位时间内航空器航向改变次数的总和。设管制扇区单位时间内航空器架次数为Q，第q架航空器的改航次数为H_q，扇区航空器改航次数为H_{total}，则$H_{total}=\sum_{q=1}^{Q}H_q$。引接实时综合航迹数据，对扇区中航空器的航向改变情况进行监视与统计，一个航空器航向连续改变达到设定参数为一次航向改变，计算得到扇区航空器改航次数。

[0075] (3) 扇区安全性指标检测

[0076] 3.1 扇区短期冲突告警频率检测

[0077] 扇区短期冲突告警频率是指管制扇区单位时间内所管辖的航空器短期冲突告警次数，引接空管自动化系统的STCA告警数据统计得到。

[0078] 3.2 扇区最低安全高度告警频率检测

[0079] 扇区最低安全高度告警频率是指管制扇区单位时间内所管辖的航空器最低安全高度告警次数，引接空管自动化系统的MSAW告警数据统计得到。

[0080] (4) 扇区经济性指标检测

[0081] 4.1 扇区排队长度检测

[0082] 在管制扇区单位时间内所管辖的航空器中，如进入扇区时出现盘旋等待等排队状况，则定义其为排队航空器，定义扇区排队长度为排队航空器的数量。引接综合航迹数据，判断目标航空器是否在扇区边界进行盘旋等待，并计算得到扇区排队长度。

[0083] 4.2 扇区航空器延误架次率检测

[0084] 在管制扇区单位时间内所管辖的航空器中，航行时间超出了正常范围的航空器定义为延误航空器，航行时间超出正常范围的部分定义为延误时间。设管制扇区单位时间内航空器架次数为 Q，扇区航空器的延误架次数为 d，扇区航空器的延误架次率为 $Drat_{sec}$，则 $Drat_{sec}$ = d/Q。引接综合航迹数据，对每架航空器在管制扇区中的实际飞行时间与经验飞行时间进行对比，若实际飞行时间大于经验飞行时间，则视为延误航空器，并计算得到扇区航空器延误架次率。

[0085] 4.3 扇区航空器延误时间检测

[0086] 在管制扇区单位时间内所管辖的航空器中，航行时间超出了正常范围的航空器定义为延误航空器，航行时间超出正常范围的部分定义为延误时间，延误时间总和定义为扇区航空器延误时间。设管制扇区单位时间内航空器架次数为 Q，第 q 架航空器的延误时间为 $Delay_q$，扇区航空器延误时间为 $Delay_{sec}$，则 $Delay_{sec}=\sum_{q=1}^{Q} Delay_q$。引接综合航迹数据，对每架航空器在管制扇区中的实际飞行时间与经验飞行时间进行对比，若实际飞行时间大于经验飞行时间，则视为延误航空器，并计算得到扇区航空器延误时间。

[0087] 4.4 扇区航空器平均延误时间检测

[0088] 在管制扇区单位时间内所管辖的航空器中，航行时间超出了正常范围的航空器定义为延误航空器，航行时间超出正常范围的部分定义为延误时间。设扇区航空器延误时间为 $Delay_{sec}$，扇区航空器的延误架次数为 Q，扇区航空器的平均延误时间为 $Davg_{sec}$，则 $Davg_{sec}$ = $Delay_{sec}$/Q。引接综合航迹数据，对每架航空器在管制扇区中的实际飞行时间与经验飞行时间进行对比，若实际飞行时间大于经验飞行时间，则视为延误航空器，并计算得到扇区航空器平均延误时间。

[0089] (5) 管制员工作负荷指标检测

[0090] 管制员为完成管制任务需承受身体上和精神上的压力，这些压力可以转化为时间上的消耗，通过时间消耗来缓解承受到的压力和完成客观任务的要求，这个时间消耗的长短就是管制员工作负荷的大小。在可测计的管制员工作时间消耗中，陆空通话信道占用率和陆空通话次数是反映管制员工作负荷的基础指标。

[0091] 5.1 陆空通话信道占用率

[0092] 陆空通话信道占用率是指管制扇区单位时间内陆空通话时长占比。设管制扇区在单位时间 T 内共陆空通话 R 次，第 r 次陆空通话的时间长度为 T_r，陆空通话信道占用率为 T_{rate}，则 $T_{rate}=\sum_{r=1}^{R} T_r / T$。引接管制语音数据，分析对应扇区管制席位的管制员与飞行员通话开始时间和结束时间，然后将每段通话的时长进行累加，从而得到扇区陆空通话时长，进而计算得到陆空通话信道占用率。

[0093] 5.2 陆空通话次数

[0094] 陆空通话次数是指管制扇区单位时间内陆空通话的次数。对管制语音数据进行分析，每次通话计为一次陆空通话，对单位时间内通话次数进行累加得出陆空通话次数。

[0095] 本发明采用了主成分分析方法，下面简要介绍一下主成分分析的基本原理：

[0096] 主成分分析(Principal Component Analysis)是一种常用的多元统计方法，它通过建立新坐标轴，寻找使原始数据方差最大的方向，实现降低数据维度并反映原始变量绝大部分信息的作用。

[0097] 设原始数据为 $X = (X_1, X_2, \cdots, X_p)$，其中 $X_1, X_2, \cdots, X_p$ 为数据的不同维度，数据 X 的期望 $E(X) = \mu$，方差 $var(X) = \Sigma$。设 $a_j = (a_{j,1}, a_{j,2}, \ldots, a_{j,p})^T$, $j = 1, 2, \ldots, p$, 均为单位向量，主成分分析需要求得下式中的 a_j 使得下式中 Y_j 的方差最大。

[0098] $Y_j = a_{j,1}X_1 + a_{j,2}X_2 + \cdots + a_{j,p}X_p \ (j = 1, 2, \cdots, p)$

[0099] 若第一主成分不能反映原始数据中足够的信息，还应考虑第二主成分，以此类推。假设 $a_j = t_1$ 时，$Y_1 = t_1^T X$ 的方差达到最大，最大值为 λ_1，则称 $Y_1 = t_1^T X$ 为第一主成分。在协方差 $cov(Y_1, Y_2) = 0$ 时，如 $a_j = t_2$ 时，$Y_2 = t_2^T X$ 的方差达到最大，最大值为 λ_2，则称 $Y_2 = t_2^T X$ 为第二主成分。同理，在协方差 $cov(Y_k, Y_j) = 0, (k \neq j, k, j = 1, 2, \cdots, p)$ 时，当 $a_j = t_j$ 时，$Y_j = t_j^T X$ 的方差达到最大，最大值为 λ_j，称 $Y_j = t_j^T X$ 为第 i 主成分。

[0100] 总方差中第 j 个主成分 Y_j 的方差所占的比例 $\lambda_j \Big/ \sum_{j=1}^{p} \lambda_j, \ (j = 1, 2, \cdots, p)$ 称为主成份 Y_j 的贡献率，用于表现该主成分反映原始变量的能力。由主成分的定义可知，p 个主成分的贡献率依次递减。前 m 个主成分的贡献率之和成为前 m 个主成分的累计贡献率，反映这些主成分解释原始变量的综合能力，常用于确定主成分的选择数目，一般取前 m 个主成分使其累计贡献率大于或等于 80%。

[0101] 由于在主成分分析方法中主成分量纲的改变会得到不同的 Y_j 值，因此不同量纲下数据大小的差异程度会直接影响主成分计算，从而影响主成分分析结果，所以需要对数据进行无量纲化处理，无量纲化处理指将原始指标值通过简单数学变化以消除各指标量纲影响的方法，常用的无量纲化方法主要包括 Z 分数法（标准差法）。

[0102] 下面结合附图对本发明做进一步的详细描述。

[0103] 如图 1 所示，本发明的一种基于主成分分析的空中交通管制扇区通行能力检测方法，具体步骤如下：

[0104] 步骤 1：选取变量

[0105] 以扇区运行性能综合指数为因变量，扇区运行性能指标共计 14 项，记自变量 x 为：

[0106] $x = \{x_j, j = 1, 2 \cdots 14\}$ (1)

[0107] 其中，扇区通行性指标为 $\{x_1, x_2\}$，扇区复杂性指标为 $\{x_3, x_4, x_5, x_6\}$，扇区安全性指标为 $\{x_7, x_8\}$，扇区经济性指标为 $\{x_9, x_{10}, x_{11}, x_{12}\}$，管制员工作负荷指标为 $\{x_{13}, x_{14}\}$；

[0108] 以 1 小时作为时间片段长度，采集扇区运行性能指标数据，组成指标样本集；

[0109] 该样本集中，时间片段的数量为 n，即样本的数量为 n，其中 n>14，扇区运行性能指

标数量为 14 个，构建 n×14 的指标矩阵 X，即：

[0110] $$X=\begin{bmatrix} x_{1,1} & x_{1,2} & \cdots & x_{1,14} \\ x_{2,1} & x_{2,2} & \cdots & x_{2,14} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ x_{n,1} & x_{n,2} & \cdots & x_{n,14} \end{bmatrix} \quad (2)$$

[0111] 管制扇区运行性能样本指标数据示例如表 1 所示：

[0112] 表 1

[0113]

序号	X_1 千米	X_2 分钟	X_3 次	X_4 次	X_5 次	X_6 次	X_7 次	X_8 次	X_9 架次	X_{10} %	X_{11} 分钟	X_{12} 分钟	X_{13} %	X_{14} 次
1	2892	512	23	4	93	301	71	92	0	8.57	8	2.67	42	95
2	2205	654	21	23	74	265	72	68	13	37.5	51	17	37	76
3	2307	426	5	19	68	339	74	122	0	18.18	8	4	68	70
……														
n	265	41	1	1	10	34	122	37	0	0	0	0	10	30

[0114] 步骤 2：数据处理

[0115] 令第 i 个时间片段的第 j 项指标的实际值为 $x_{i,j}$，$\overline{x_j}$ 为第 j 项指标 x_j 的均值：

[0116] $$\overline{x_j}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}x_{i,j} \quad (3)$$

[0117] s_j 为第 j 项指标 x_j 的标准差：

[0118] $$s_j=\sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(x_{i,j}-\overline{x_j})^2} \quad (4)$$

[0119] $y_{i,j}$ 为第 i 个时间片段无量纲化处理后的第 j 项指标值，扇区运行性能指标分为两类，第一类为正向指标，即值越大越好的指标，第二类为逆向指标，即值越小越好的指标；对于正向指标：

[0120] $$y_{i,j}=\frac{x_{i,j}-\overline{x}_j}{s_j} \quad (5)$$

[0121] 对于逆向指标，先取其倒数或取负获得正向化过渡指标 $X_j'=(x_{1,j}',x_{2,j}',\ldots,x_{n,j}')^T$ 及其均值 $\overline{x}_j'$、标准差 s_j'，再进行无量纲化处理，即：

[0122] $$x_{i,j}'=\frac{1}{x_{i,j}} \text{ 或 } x_{i,j}'=-x_{i,j} \quad (6)$$

[0123] $$y_{i,j}=\frac{x_{i,j}'-\overline{x}_j'}{s_j'} \quad (7)$$

[0124] 步骤 3：主成分的确定

[0125] 无量纲化处理后，14 个指标的协方差矩阵就是相关系数矩阵，计算相关系数

矩阵的特征值 λ_j，并按从小到大排序，根据第 j 大特征值 λ_j所对应的特征向量 $\varepsilon_j=(\varepsilon_{j,1},\varepsilon_{j,2},\ldots,\varepsilon_{j,14})^T$就可以确定指标矩阵 X 的第 j 个主成分；对于样本集中第 i 个时间片段的样本指标数据，第 j 个主成分为：

[0126] $$Y_{i,j}=\varepsilon_{j,1}y_{i,1}+\varepsilon_{j,2}y_{i,2}+\ldots+\varepsilon_{j,14}y_{i,14},\ j=1,2,\ldots,14 \quad (8)$$

[0127] 第 j 个主成分的贡献率为：

[0128] $$w_j=\frac{\lambda_j}{\sum_{j=1}^{14}\lambda_j} \quad (9)$$

[0129] 取 m 个主成分，使累计贡献率达到 80％以上：

[0130] $$\sum_{j=1}^{m}w_j\geq 0.80 \quad (10)$$

[0131] 其中，m 是指主成分累计贡献率达到 80％以上时对应的主成分个数；

[0132] 步骤 4：扇区运行性能综合指数的计算

[0133] 对于样本集中第 i 个时间片段的样本指标数据，结合计算得到的主成分及其贡献率可计算出扇区运行性能综合指数为：

[0134] $$E_i=\sum_{j=1}^{m}w_jY_{i,j} \quad (11)$$

[0135] 在公式 (3)-(11) 中，i 为样本序号，取值为 1 到 n，j 为指标序号，取值为 1 到 14；

[0136] 步骤 5：扇区通行能力检测

[0137] 基于扇区流量数据和扇区运行性能综合指数，得到傅里叶函数拟合式；

[0138] 步骤 6：根据傅里叶函数拟合式，获得扇区运行性能综合指数高位区间所对应的扇区流量作为扇区通行能力检测结果。

[0139] 其中，扇区通行性指标分别为扇区航行里程、扇区航行时间。

[0140] 扇区复杂性指标分别为扇区航空器爬升次数、扇区航空器下降次数、扇区航空器改速次数、扇区航空器改航次数。

[0141] 扇区安全性指标分别为扇区短期冲突告警频率和扇区最低安全高度告警频率。

[0142] 扇区经济性指标分别为扇区排队长度、扇区航空器延误架次率、扇区航空器延误时间、扇区航空器平均延误时间。

[0143] 管制员工作负荷指标分别为陆空通话信道占用率、陆空通话次数。

[0144] 步骤 1 中的时间片段长度可自定义为 15 分钟。

[0145] 步骤 1 中的时间片段长度可自定义为 30 分钟。

[0146] 步骤 2 中的正向指标包括扇区通行性指标和管制员工作负荷指标。

[0147] 步骤 2 中的逆向指标包括扇区复杂性指标、扇区安全性指标和扇区经济性指标。

[0148] 下面以一个实施例进行具体说明：

[0149] 步骤 1：采集成都 ACC01 扇区相关指标数据共计 208 组；

[0150] 步骤 2：导入 MATLAB 编程实现主成分分析法。主成分分析结果如表 2 所示，原始指标共计 14 个，经主成分分析，前 8 个主成分的总贡献率达到 83.92％，故采用这 8 个主成分计算扇区运行性能综合指数。

[0151] 表 2 208 个时段的扇区运行能力主成分分析结果

[0152]

主成分	1	2	3	4	5	6	7	8
特征值	3.0373	2.0412	1.5623	1.2565	1.0136	0.8735	0.7980	0.6100
特征向量	-0.3347 0.3578 0.0648 0.0954 -0.2349 -0.2867 0.2152 -0.1180 0.0531 0.0618 -0.0467 0.4184 0.4661 0.3845	-0.2421 -0.4664 -0.0978 -0.0945 0.2721 0.3839 -0.2358 0.3901 0.1112 -0.0931 -0.0417 0.2984 0.3124 0.2585	0.1645 -0.0981 0.5472 0.5919 0.0131 0.2024 -0.0319 -0.0900 -0.1452 -0.1888 0.4271 0.1386 0.0254 0.0654	-0.1774 -0.0130 -0.0917 0.0589 0.1953 -0.2116 0.6031 0.4533 -0.2214 -0.4380 0.1310 -0.1212 0.0367 -0.1741	0.0769 0.0002 0.0720 0.3036 0.3978 -0.2042 0.1299 0.0097 0.7934 0.0775 -0.1266 0.0308 -0.0043 -0.1653	-0.0257 -0.0961 0.3161 -0.0695 0.1559 -0.1285 -0.1173 -0.3096 -0.1192 -0.5631 -0.6315 -0.0191 -0.0115 0.0661	0.3370 0.0737 -0.4704 -0.1231 0.1129 -0.1667 -0.1855 -0.2706 0.1367 -0.5022 0.4159 0.1335 0.0829 0.1666	0.0343 0.0237 -0.1623 0.2178 -0.6990 0.3091 0.0431 0.1956 0.3486 -0.3611 -0.1933 -0.0639 -0.0765 -0.0310
贡献率	0.2170	0.1458	0.1116	0.0897	0.0770	0.0724	0.0624	0.0570
累计贡献率	0.2170	0.3628	0.4744	0.5641	0.6411	0.7135	0.7759	0.8392

[0153] 步骤 3、根据主成分分析结果，根据前 8 个主成分得出扇区运行性能综合指数。扇区运行性能综合指数在 MATLAB 中为 208*1 的矩阵，如图 2 所示。

[0154] 步骤 4：上述 14 项扇区流量数据与扇区运行性能综合指数进行拟合，得到傅里叶函数拟合式：

[0155] $y = 0.5846|0.3251\cos(0.1307x)0.770\sin(0.1307x)$

[0156] 步骤 5：基于傅里叶函数拟合式，如图 3 所示，当扇区流量处于 39 架次时，扇区运行性能综合指数处于高位，因此，将 39 架次 /h 确定为该扇区通行能力检测结果。

[0157] 本实施例首先对原始数据进行分析，选取出 8 个主成分用于计算扇区运行性能综合指数，较大程度地包含了原始指标信息，通过拟合、对比得出当扇区流量处于 39 架次时，扇区运行性能综合指数处于高位，相比于传统的扇区通行能力检测方法更加全面、科学、准确。

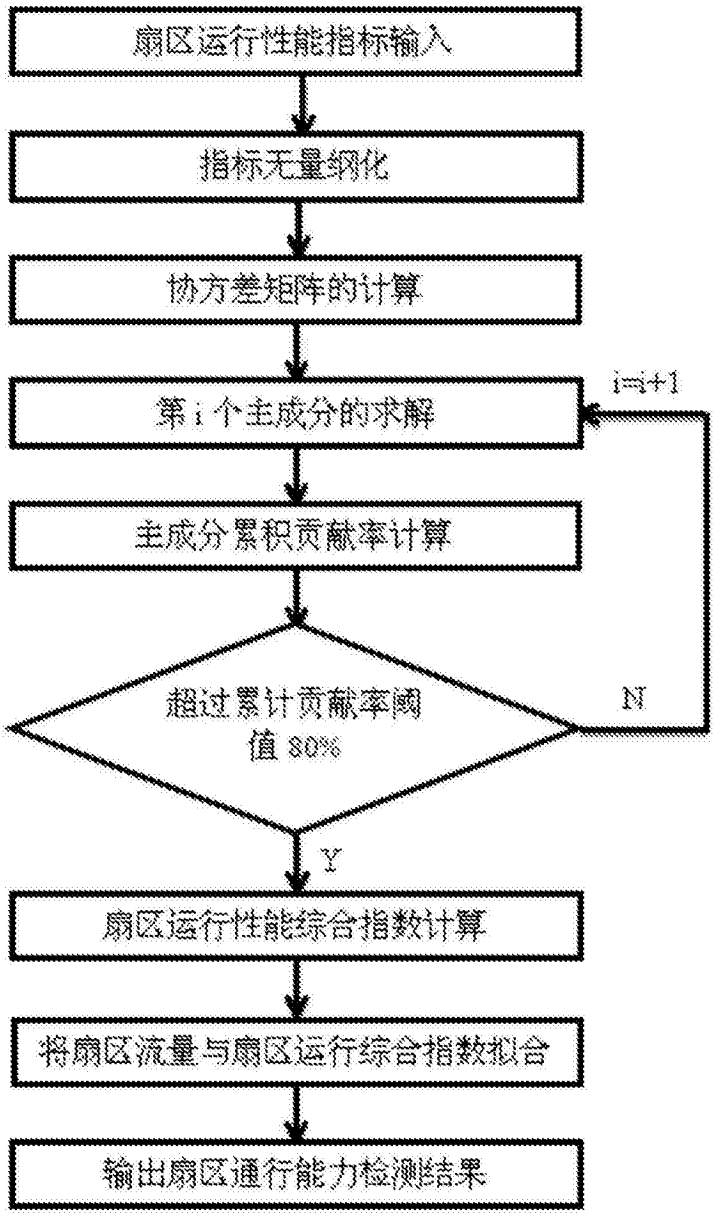

扇区运行性能指标输入
指标无量纲化
协方差矩阵的计算
第 i 个主成分的求解
i=i+1
主成分累积贡献率计算
超过累计贡献率阈值 80%
N
Y
扇区运行性能综合指数计算
将扇区流量与扇区运行综合指数拟合
输出扇区通行能力检测结果

图 1

208x1 double

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
198	0.5045									
199	0.6105									
200	0.5445									
201	0.6437									
202	-0.0389									
203	0.6645									
204	0.5237									
205	0.7239									
206	0.2557									
207	-0.2927									
208	0.0652									

图 2

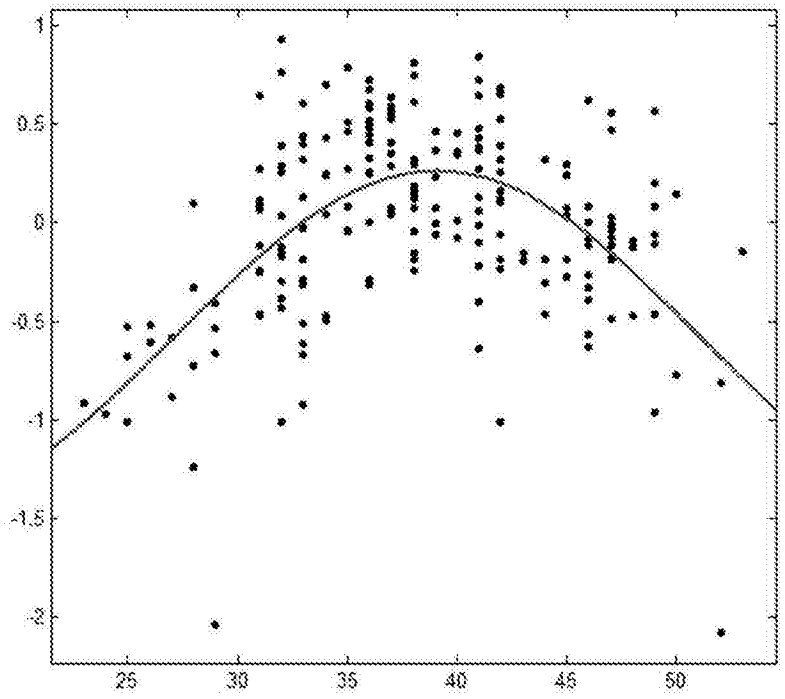


图 3