

DOI:10.16356/j.1005-2615.2015.01.009

# 一种基于航空器气象资料下传数据的飞行剖面生成方法

邢健<sup>1</sup> 汤新民<sup>1</sup> 韩松臣<sup>1</sup> 陈平<sup>2</sup> 顾俊伟<sup>1</sup>

(1. 南京航空航天大学民航学院, 南京, 211106;

2. 中国电子科技集团第二十八研究所, 南京, 210007)

**摘要:** 由于飞行剖面识别是航空器四维(Four-dimensional, 4D)航迹预测研究的热点问题, 提出一种基于航空器气象资料下传(Aircraft meteorological data relay, AMDAR)数据的全飞行过程剖面生成方法, 包括由高度-航程构成的标称高度剖面和空速-航程构成的标称速度剖面。首次将动态空间规整算法(Dynamic space warping, DSW)应用到飞行高度剖面的相似距离计算中, 计算出标称飞行高度剖面; 为解决在地速未知情况下标称速度剖面的计算问题, 结合大椭圆距离算法与航空器基本性能数据库(Base of aircraft data, BADA), 给出一种标称飞行速度剖面的计算方法, 该方法保留了 AMDAR 实测历史数据中所隐含的飞行意图与气象因素。实际算例表明, 本文提出的方法能够有效地得到真实反映航空器飞行状态的全飞行剖面。

**关键词:** 交通运输工程; 空中交通管理; 航空器气象资料下传数据; 飞行剖面

**中图分类号:** V355 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2015)01-0064-07

## Method for Generating Flight Profile Based on AMDAR Data

Xing Jian<sup>1</sup>, Tang Xinmin<sup>1</sup>, Han Songchen<sup>1</sup>, Chen Ping<sup>2</sup>, Gu Junwei<sup>1</sup>

(1. Civil Aviation College, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 211106, China;

2. The 28th Research Institute, China Electronics Technology Group Corporation, Nanjing, 210007, China)

**Abstract:** Flight profile recognition is a hot issue in aircraft four-dimensional (4D) trajectory prediction. A novel method based on aircraft meteorological data relay (AMDAR) data is proposed to generate flight profile. The method includes a nominal altitude profile constituted with altitude-range and a nominal speed profile constituted with speed-time. Firstly, the dynamic space warping (DSW) algorithm is applied in calculating the similarity distance of flight altitude profile while generating the nominal flight altitude profile. Then the large oval distance algorithm combining with the base of aircraft data (BADA) model is proposed to achieve a nominal flight speed profile when ground speed is unknown. Flight intent and meteorological factors retained in AMDAR data are observed in the calculated flight profiles. A case study demonstrates that the proposed approach can effectively provide a complete flight profile reflecting the real aircraft flight status.

**Key words:** traffic engineering; air traffic management; AMDAR data; flight profile

中国民航业高速发展, 空中交通愈加繁荣, 随着大型枢纽机场的飞机起降架次迅速增长, 空中交通管理和机场管理面临着越来越大的压力。然而,

以飞行计划为中心的空管自动化系统对飞行剖面推算能力较差, 不能为航空器配备精确的空管间隔, 因此容易造成空中交通拥挤。为此, 美国和欧

**基金项目:** 国家自然科学基金(61174180)资助项目; 中国博士后科学基金(2014M550291)资助项目; 江苏省产学研联合创新基金(BY2012014)资助项目; 南京航空航天大学工作启动基金(56YAH14025)资助项目。

**收稿日期:** 2014-04-11; **修订日期:** 2014-09-21

**通信作者:** 汤新民, 男, 副教授, E-mail: tangxinmin@nuaa.edu.cn。

洲分别计划实施采用 4D 航迹运行的新一代空中管理系统更好地实现空中交通安全和效率。4D 航迹是以航空器的经度、纬度、高度与时间坐标对航空器全部飞行路径的关键点和时间加以精确描述的轨迹。中国也于 2007 年开始规划发展民航新一代空中交通管理系统,据预计 2025 年完成<sup>[1]</sup>,届时将实现飞行任务的 4D 航迹管理,从而提高空中交通效率并减少排放和污染。

近年来,国内外一些学者对 4D 航迹预测的研究通常基于航空器动力学模型。将飞行过程划分为若干阶段,并分段建立运动学方程,如:文献[2]研究了航空器在终端区范围内的飞行剖面数值积分算法和简化代数算法,但未考虑气象影响与飞行意图;文献[3,4]按照飞行阶段特点划分基本飞行模型的方法,并用基本飞行模型构建了航空器的飞行剖面,但按照飞行阶段划分并建立的飞行剖面模型过于理想,航空器在实际飞行过程中的诸多动力学参数并不易获得,理想的阶段划分并不一定符合真实的飞行轨迹,航空器的飞行同样受到地面管制的影响,管制意图与飞行意图未能在动力学模型中体现;文献[5]通过挖掘历史飞行时间数据,对飞行的全程时间进行了预测,虽然引入了气象因子与管制意图因子,但未对飞行剖面进行辨识;文献[6]基于雷达数据采用 K 均值聚类的方法对终端区航迹进行聚类分析,监控航空器实际运行状态,但用历史雷达数据进行航迹聚类,难以得到全飞行剖面。

本文从航空器实际飞行状态出发,利用航空器气象资料下传(Aircraft meteorological data relay, AMDAR)数据得到不依赖于牛顿力学模型的飞行剖面,且在 AMDAR 实测数据中已隐含管制因素和气象因素的影响,为今后结合航路气象模型对飞行剖面精确推算提供了方法,从而更好地对空中交通流量进行战略性管理,提高空域资源的利用率。

## 1 历史航迹数据处理

### 1.1 AMDAR 数据特点

AMDAR 是国际民航组织和国际气象组织在全球范围内积极推动的一个气象观测项目,它利用商业飞行器采集大气数据,通过地空数据链实时或近实时发送回地面。2004 年中国 AMDAR 数据开始参与全球电信系统交换,标志着中国 AMDAR 项目的数据采集和传输部分基本完成。

目前国内商用飞机上气象观测要素包括时间、经纬度、高度、气温、风向、风速等。飞机在各阶段的观测频次如表 1 所示<sup>[7]</sup>。

表 1 飞机各阶段观测频次

Tab. 1 Frequency of observation during different stages of plane

不同阶段	飞行状态/m	观测频次间隔/s
爬升阶段	0~1 400	6
	1 400~6 000	20
巡航阶段	8 000~12 000	180
下降阶段	6 000~0	60

从表中数据可以看出,飞机在起降阶段垂直分辨率较高,尤其是在 0~1 400 m 爬升阶段,数据的空间密度最大。图 1 为 2014 年 2 月 24 日 08:00~12:00 中国 AMDAR 数据分布示意图,数据来自美国国家海洋和大气管理局网站,共有 37 408 个观测数据。由于中国 AMDAR 项目仍处于起步阶段,并受到实际航线的制约,目前 AMDAR 资料在中国分布并不均匀,主要集中在东部地区,西部地区稀少,广州、上海等地区尤为密集。

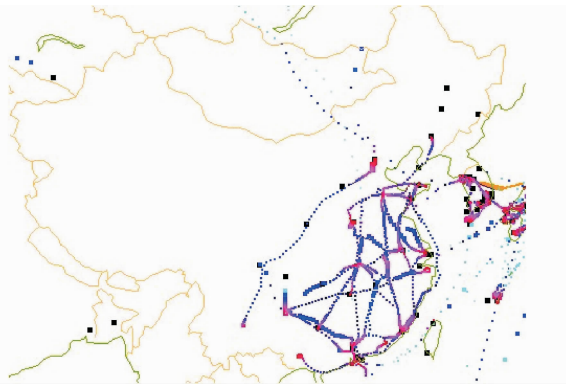


图 1 中国 AMDAR 数据分布情况示意图

Fig. 1 Diagram of AMDAR distribution in China

### 1.2 数据质量控制

AMDAR 数据虽然为航空器飞行过程中的实测数据,然而为获取高质量的观测资料必须对其质量进行检验与控制。本文采用气象数据质量控制方案对 AMDAR 数据进行时间一致性与空间一致性质量控制分析<sup>[8]</sup>,从气象数据质量角度入手对 AMDAR 数据的整体质量进行控制。

(1) 时间一致性:从气象要素随时间变化的角度检查气象信息。时间一致性检查的具体方法是气象观测要素与其相邻时次的气象观测要素进行比较,如果差值超出给定范围,即识别出含有粗大误差的数据并剔除。时间一致性检查判据为

$$\text{Max}(DA) = \text{Max}(\delta a / \delta z) \Delta z + \text{Max}(\delta a / \delta \varphi) \Delta \varphi + \text{Max}(\delta a / \delta t) \Delta t \quad (1)$$

式中:  $\delta a / \delta z$ ,  $\delta a / \delta \varphi$ ,  $\delta a / \delta t$  分别代表观测要素随高度、纬度和时间的变化率;  $\Delta z$ ,  $\Delta \varphi$ ,  $\Delta t$  分别代表观

测点的高度差、纬度差和时间差。 $\text{Max}(\delta a / \delta z)$ ,  $\text{Max}(\delta a / \delta \varphi)$ ,  $\text{Max}(\delta a / \delta t)$  取值如表 2 所示<sup>[8]</sup>。

表 2 观测要素随高度、纬度和时间的最大变化率

Tab. 2 The maximum change rate of observation factors with height, latitude and time

要素	$\text{Max}(\delta a / \delta z)$	$\text{Max}(\delta a / \delta \varphi)$	$\text{Max}(\delta a / \delta t)$
温度	4 °C/100 m	4 °C/1°	5 °C/1 h
风	10 m · s <sup>-1</sup> / 100 m	10 m · s <sup>-1</sup> / 1°	20 m · s <sup>-1</sup> / 1 h

(2) 空间一致性: 以当前值作为观测值, 周围观测数据作为分析值, 要求观测值和估计值的差小于给定判据, 如果差值超出给定范围, 即识别出含有粗大误差的数据并剔除。由 Barnes 分析法计算估计值, 并利用观测余差替代观测值。空间一致性检查公式如下

$$x' = x_j - \sum_{i=1}^p \omega_i x_i / \sum_{i=1}^p \omega_i \quad (2)$$

$$\omega_i = 1 / (1 + 4r_i^2) \quad (3)$$

$$r_i = 6371 \times \arccos[\sin\varphi_i \sin\varphi_j + \cos\varphi_i \cos\varphi_j \cos(\theta_i - \theta_j)] \quad (4)$$

式中:  $p$  为分析值的总个数;  $x'$  为空间插值余差;  $x_j$  为被检查点观测余差;  $x_i$  为周围观测点余差;  $\omega_i$  为插值权重;  $r_i$  为  $j$  点与  $i$  点的距离。

## 2 依据 DSW 算法的标称高度剖面生成

### 2.1 飞行高度剖面与标称高度剖面

飞行高度剖面是指在地面坐标系中飞行高度与航程的二维图象轨迹, 即垂直方向上的航迹。典型的飞行高度剖面可分为 3 个阶段, 如图 2 所示:  $a \sim d$  阶段为上升阶段;  $e, f$  阶段为巡航阶段;  $g \sim j$  阶段为下降阶段。具体各阶段的飞行参数定义可详见文献[9]。

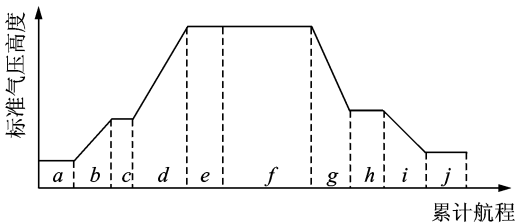


图 2 典型飞行高度剖面

Fig. 2 Diagram of typical flight altitude profile

对于同一航班, 由于管制因素影响, 其飞行高度剖面不会完全相同。从众多飞行高度剖面中略去随机性, 找到一条具有代表性的飞行高度剖面, 即为标称飞行高度剖面。

### 2.2 依据 DSW 算法的标称高度剖面提取

动态时间规整 (Dynamic time warping, DTW) 算法最早应用在语音识别领域中, 解决了发音长短不一的模式匹配问题<sup>[10]</sup>。该方法在全区间相似聚类的基础上, 放松了对时间维的限制。对于同一航班, 只需保证航迹记录点之间的时间顺序, 而不需要在各个时刻对应比较, 航迹的时间维可以被局部拉伸和缩放的。在此方法的基础上, 考虑到飞行剖面与航程的关系, 本文提出一种基于动态空间规整 (Dynamic space warping, DSW) 算法。对于同一航班, 每天的航程不可能完全相同, 但包含管制意图的飞行剖面具有相似的特点, 因此可以放松对航程空间维的限制, 计算并比较各剖面间的 DSW 距离, 最终提取与其他剖面 DSW 距离最短的一条飞行高度剖面为标称飞行高度剖面。DSW 算法原理示意图如图 3 所示, 首先根据端点检测的结果判断出参考模板和测试模板的起始点, 然后找出与测试模板第一帧匹配的参考模板的帧数, 以此作为路径的第一点, 依次计算寻找下一个匹配点, 最终就会得到一条从左下到右上的折线, 这条折线就是 DSW 算法的路径。

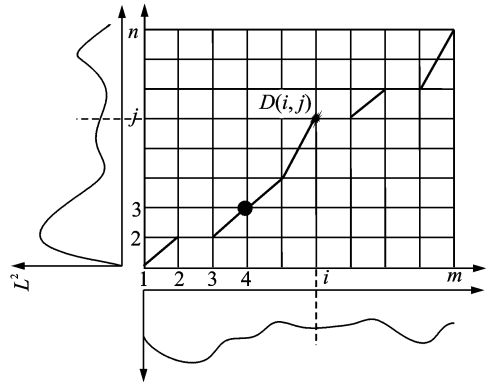


图 3 DSW 算法原理示意图

Fig. 3 Diagram of DSW algorithm

基于 DSW 算法的标称高度剖面提取过程如下: 假设  $L^1 = (l_1^1, l_2^1, \dots, l_m^1)$  和  $L^2 = (l_1^2, l_2^2, \dots, l_n^2)$  序列分别代表两条航迹, 选取  $L^1$  为参考模板,  $L^2$  为测试模板, 其长度分别为  $m$  和  $n$ , 可构造  $m \times n$  的矩阵  $A_{m \times n}$ 。假设  $A_{m \times n}$  中元素为  $a_{ij}$ , 且  $a_{ij} = \sqrt{(l_i^1 - l_j^2)^2}$ 。

矩阵  $A_{m \times n}$  中弯曲路径  $W = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_k)$ ,  $W$  的第  $k$  个元素为  $\omega_k = (a_{ij})_k$ , 这条路径满足下列条件:

$$(1) \max\{m, n\} < k \leq m + n - 1;$$

$$(2) \omega_1 = a_{11}, \omega_k = a_{mn};$$

(3) 对于  $w_k = a_{ij}, w_{k-1} = a_{i'j'}$ , 满足  $0 \leq i - i' \leq 1, 0 \leq j - j' \leq 1$ , 则

$$DSW(L^1, L^2) = \min \left\{ \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k w_i \right\}$$

DSW 算法是运用动态规划思想寻找一条具有最小弯曲代价的路径, 弯曲路径的最小累加值

$$\begin{cases} D(1, 1) = a_{11} \\ D(i, j) = a_{ij} + \min \{ D(i-1, j-1), \\ D(i, j-1), D(i-1, j) \} \end{cases}$$

图 4 表示 DSW 距离计算  $L^1$  序列和  $L^2$  序列时各个元素对应关系, 某些点在计算 DSW 距离时多次使用, 实际上是对序列维度的局部拉伸。其中图 4 中表示点  $l_4^1$  和点  $l_3^2$  配对。

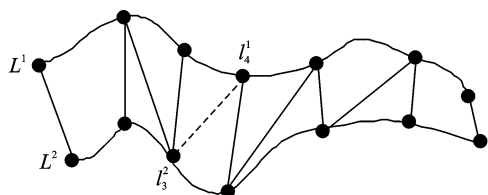


图 4 两飞行高度剖面对应关系示意图

Fig. 4 Relational figure of two flight altitude profiles

### 3 依据 BADA 模型的标称速度剖面生成

#### 3.1 飞行速度剖面与标称速度剖面

飞行速度剖面是指, 航空器在飞行过程中飞行速度与航程的二维图像轨迹, 不考虑航空器在各个航路点的转弯动作, 仅考虑在不同航路点之间速度的变化, 且假设转弯过程为匀速飞行, 因此整个飞行阶段可以等效为不同航路点之间速度变化的直线飞行。飞行速度剖面反映了空速大小随航程的变化情况。典型的飞行速度剖面也是由一系列剖面段连接而成, 如图 5 所示:  $a$  阶段为起飞加速阶段;  $b$  阶段为等校正空速爬升阶段;  $c$  阶段为加速到巡航速度阶段;  $d$  阶段为等表速或等马赫数巡航阶段;  $e$  阶段为减速阶段;  $f$  阶段为等校正空速下降阶段;  $g$  阶段为减速着陆阶段。

对于同一航班, 由于飞行操纵与气象因素影响, 其飞行速度剖面不会完全相同。从众多飞行速

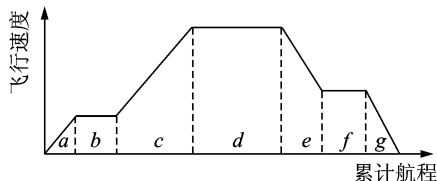


图 5 典型飞行速度剖面

Fig. 5 Diagram of typical flight speed profile

度剖面中略去随机性, 找到一条具有代表性质的飞行速度剖面, 即为标称飞行速度剖面。

#### 3.2 依据 BADA 模型的标称速度剖面生成

由于目前由美国国家海洋和大气管理局公布的 AMDAR 数据中不含有地速信息, 因此本文采用大椭圆距离算法对空间坐标进行转换计算地速与真空速, 进而通过应用 BADA 模型得到校正空速-飞行时间剖面, 即标称飞行速度剖面。

大椭圆距离法<sup>[11]</sup>就是通过椭圆面上两已知点和该椭圆中心所作的平面与椭圆面的交线, 是与地线十分接近的规则曲线, 是计算空间两点距离的一种有效方法, 其示意图如图 6 所示。

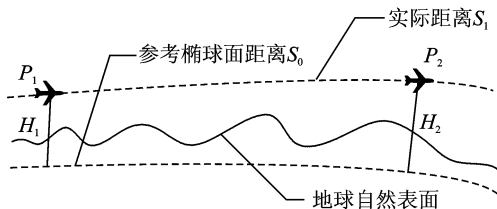


图 6 大椭圆法距离计算示意图

Fig. 6 Diagram of large oval distance algorithm

设航空器在  $P_1$  和  $P_2$  点的坐标分别为  $(B_1, L_1, H_1)$  和  $(B_2, L_2, H_2)$ ,  $B$  表示大地纬度,  $L$  表示大地经度,  $H$  表示飞行高度。大地坐标转换为空间直角坐标的关系式为<sup>[12-13]</sup>

$$\begin{cases} X = (N + H) \cos B \cos L \\ Y = (N + H) \cos B \sin L \\ Z = [N(1 - e^2) + H] \sin B \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 B}}$  为卯酉圈曲率半径;  $a$  为椭圆长轴长;  $e$  为其第一偏心率。当考虑飞行高度计算航行距离时, 应参考大椭圆距离法, 公式的详细推导见文献<sup>[11]</sup>。

采用差分方法可以计算得到  $v_{GS}$ , 包括大小和方向, 由于航空器航向受高空风的影响, 由 AMDAR 气象数据可直接得到  $v_{WS}$  的大小和方向, 因此可通过由空速、地速和风 3 个矢量构成的航行速度三角形计算得到  $v_{TAS}$  大小和方向。航行速度三角形如图 7 所示。

图中:  $v_{TAS}$  表示真空速;  $v_{GS}$  表示地速;  $v_{WS}$  表示风速;  $DA$  为偏流角, 即航迹线偏离航向线的角度;  $WA$  为风角, 即航迹线与风向线之间的夹角。根据向量合成法则, 有

$$v_{GS} = v_{TAS} + v_{WS} \quad (6)$$

最后由 BADA 模型校正空速  $v_{CAS}$  与真空速

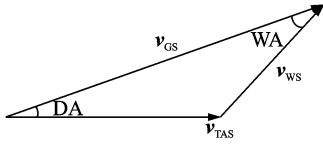


图7 飞行速度三角形

Fig. 7 Diagram of flying speed triangle

$v_{TAS}$  的转换关系,得到所需校正空速剖面。

根据 BADA 模型得到真空速  $v_{TAS}$  大小和校正空速  $v_{CAS}$  大小的转换关系如下

$$v_{TAS} = 1\,479.1 \times \left\{ \frac{t_{LOC}}{t_{MSL}} \left[ \left( 1 + \frac{\eta}{\delta} \right)^{1/3.5} - 1 \right] \right\}^{1/2} \quad (7)$$

$$\eta = \left[ 1 + 0.2 \times \left( \frac{v_{CAS}}{661.5} \right)^2 \right]^{3.5} - 1 \quad (8)$$

$$\delta = \begin{cases} (1 - 6.875\,59 \times 10^{-6} \times h_p)^{5.255\,88} & h_p \leq 36\,089 \text{ ft} \\ 0.223\,360\,9 \times \exp\left(\frac{36\,089 - h_p}{20\,805.8}\right) & h_p > 36\,089 \text{ ft} \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $t_{LOC}$  表示航空器周围温度,单位为开尔文;  $t_{MSL}$  表示海平面标准大气温度,单位为开尔文;  $h_p$  表示航空器所在高度,高度单位为英尺。将式(8)代入式(9),得到

$$v_{CAS} = 1\,479.2 \left[ (\delta\psi - \delta + 1)^{1/3.5} - 1 \right]^{1/2} \quad (10)$$

$$\psi = \left[ \frac{t_{MSL}}{t_{LOC}} \left( \frac{v_{TAS}}{1\,479.1} \right)^2 + 1 \right]^{3.5} \quad (11)$$

式中  $\eta, \delta, \psi$  为中间参数,无实际意义。

## 4 案例

本文以从西安咸阳机场(ZLXY)飞往江西南昌昌北机场(ZSCN)的某航班为例,其中部分 AMDAR 数据如表 3 所示。

首先从同一航班的 7 天 AMDAR 数据中得到 548 个观测点,并对所有观测点进行质量控制分析,去除部分不符合时间一致性和空间一致性的点,

表3 AMDAR 数据表(部分)

Tab. 3 Partial data of AMDAR

纬度/ (°)	经度/ (°)	高度/ ft	风速/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	温度/ °C
34.434 0	108.769 0	1 300	3	9.0
34.417 0	108.752 0	2 000	9	8.1
34.417 0	108.735 0	2 800	13	5.8
34.417 0	108.735 0	2 900	13	5.3
34.400 0	108.735 0	3 100	13	5.0
34.383 0	108.685 0	4 100	16	2.5
34.350 0	108.652 0	5 700	11	-0.6

最终得到 514 个符合观测点。因为 AMDAR 数据返回的是经纬度信息,通过兰伯特投影将经纬度数据坐标转换为以西安机场基准点为原点的空间直角坐标。图 8 为原始飞行高度剖面图。

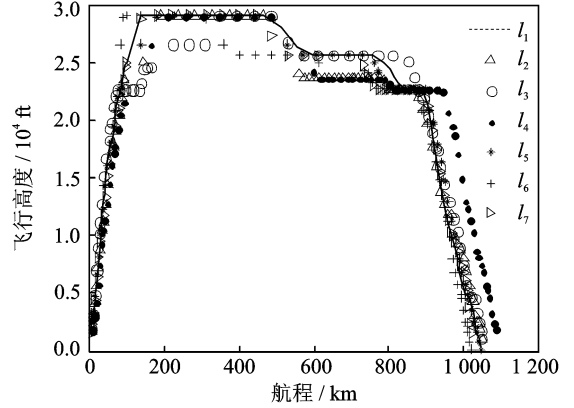


图8 原始飞行高度剖面图

Fig. 8 Diagram of original flight altitude profile

通过计算各航迹之间的 DSW 距离得到表 4。比较各航迹之间的总距离大小,可以看出航迹  $l_5$  与其余各航迹总距离最小为 19.99,因此提取  $l_5$  为标称航迹。最终通过仿真得到标称飞行剖面图及其在 Google Earth 下的三维显示如图 9 所示。

表4 DSW 距离表

Tab. 4 Distance table of DSW

航迹	$l_1$	$l_2$	$l_3$	$l_4$	$l_5$	$l_6$	$l_7$
$l_1$	0.00	5.45	18.65	2.12	4.22	6.45	27.89
$l_2$	5.45	0.00	1.89	3.79	0.62	1.31	7.42
$l_3$	18.65	1.89	0.00	7.38	3.16	3.59	3.28
$l_4$	2.12	3.79	7.38	0.00	2.58	4.83	22.88
$l_5$	4.22	0.62	3.16	2.58	0.00	1.43	7.98
$l_6$	6.45	1.31	3.59	4.83	1.43	0.00	10.82
$l_7$	27.89	7.42	3.28	22.88	7.98	10.82	0.00
总距离	64.78	20.48	37.95	43.58	19.99	28.43	80.27

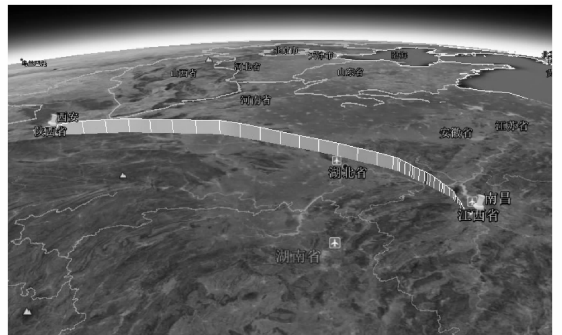


图9 标称高度剖面仿真结果图

Fig. 9 Simulation result of nominal flight altitude profile

绘制该航班的风向玫瑰图与风速玫瑰图如图 10 所示。

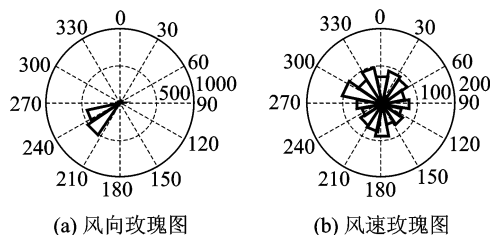


图 10 风玫瑰图

Fig. 10 Diagram of wind rose

根据国际大地测量与地球物理联合会推荐数据取参考长轴长  $a = 6\,378\,137\text{ m}$ , 第一偏心率  $e = 1 : 298.257$ ,  $t_{\text{MSL}} = 288.15\text{ K}$ , 其中为标称速度剖面生成所做的部分 AMDAR 数据转换, 如表 5 所示。

表 5 AMDAR 数据转换表(部分)

Tab. 5 Partial conversion data of AMDAR

时间	X/ km	Y/ km	Z/ km	风向/ (°)	风速/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )
0:16:06	4 914.20	2 360.61	3 299.54	232.38	31.35
0:16:34	4 805.18	2 305.56	3 492.07	230.27	33.41
0:17:02	4 820.58	2 309.63	3 468.24	229.57	33.15
0:17:38	4 931.68	2 358.32	3 275.17	229.22	31.10
0:18:06	4 998.24	2 386.50	3 152.37	228.87	29.81

最终通过计算得到标称速度剖面图, 如图 11 所示。

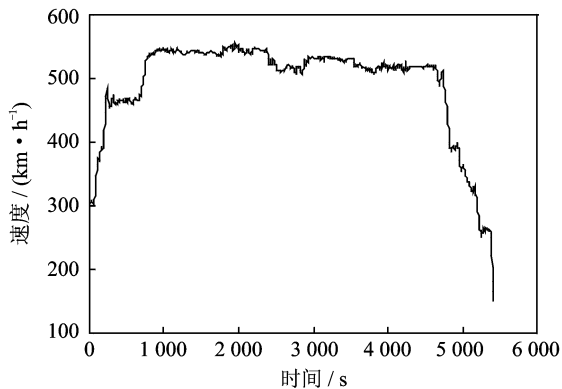


图 11 标称速度剖面图

Fig. 11 Diagram of nominal flight speed profile

## 5 结束语

本文根据航空器运行的实际特点, 研究了一种基于 AMDAR 数据的标称飞行剖面的拟合方法, 利用 DSW 距离算法与 BADA 模型等给出飞行全过程剖面, 能准确地反映航空器飞行过程中高度与速度的变化。算例表明了该方法的可行性, 对实际

飞行程序优化与战略流量管理有一定的借鉴作用。该方法亦可推广至 QAR 数据等进行飞行剖面生成。下一步作者将根据气象数据建立气象修正模型对实时剖面进行修正, 并通过与 ADS-B 等多数据的融合处理, 克服 AMDAR 数据时空局限性的不足。

## 参考文献:

[1] 吕小平. 中国民航新一代空中交通管理系统发展总体框架[J]. 中国民用航空, 2007(8): 24-26.  
Lv Xiaoping. General framework of China's new generation civil aviation ATM system[J]. China Civil Aviation, 2007(8): 24-26.

[2] 吴树范, 郭锁凤. 基于四维导引的飞机纵向飞行剖面的解算与综合[J]. 航空学报, 1993, 14(5): 261-268.  
Wu Shufan, Guo Suofeng. Synthesis of aircraft vertical flight profile based on four-dimensional guidance in terminal airspace[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1993, 14(5): 261-268.

[3] 王超, 郭九霞, 沈志鹏. 基于基本飞行模型的 4D 航迹预测方法[J]. 西南交通大学学报, 2009, 44(2): 295-300.  
Wang Chao, Guo Jiuxia, Shen Zhipeng. Prediction of 4D trajectory based on basic flight models[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2009, 44(2): 295-300.

[4] 汤新民, 韩云祥, 韩松臣. 基于混杂系统模型的航空器 4D 航迹推测[J]. 南京航空航天大学学报, 2012, 44(1): 105-112.  
Tang Xinmin, Han Yunxiang, Han Songchen. Aircraft 4D trajectory estimation based on hybrid system model[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2012, 44(1): 105-112.

[5] 吴鹏, 潘薇. 基于数据挖掘的四维飞行轨迹预测模型[J]. 计算机应用, 2008, 27(11): 2637-2639.  
Wu Kun, Pan Wei. 4D trajectory prediction model based on data mining[J]. Computer Applications, 2008, 27(11): 2637-2639.

[6] Gariel M, Srivastava A N, Feron E. Trajectory clustering and an application to airspace monitoring[J]. Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions on, 2011, 12(4): 1511-1524.

[7] 贾朋群, 胡英, 王金星. 民用航空气象观测综述[J]. 气象科技, 2004, 32(4): 213-218.  
Jia Pengqun, Hu Ying, Wang Jinxing. Reviews of meteorological observation from commercial aircrafts

- [J]. *Meteorological Science and Technology*, 2004, 32(4): 213-218.
- [8] 陶士伟,郝民,赵琳娜. AMDAR 观测资料分析及质量控制[J]. *气象*, 2009, 35(12): 65-73.  
Tao Shiwei, Hao Min, Zhao Linna. Quality control procedures and its application in AMDAR observation data[J]. *Meteorological Monthly*, 2009, 35(12): 65-73.
- [9] 丁松滨. 飞行性能与飞行计划[M]. 北京:科学出版社, 2013.  
Ding Songbin. Flight performance and flight plan [M]. Beijing: Science Press, 2013.
- [10] Lichtenauer J F, Hendriks E A, Reinders M J T. Sign language recognition by combining statistical DTW and independent classification [J]. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, 2008, 30(11): 2040-2046.
- [11] 卫泽,李厚朴. 顾及高程时计算两点间大地距离的实用方法[J]. *舰船电子工程*, 2011, 31(8): 52-55.  
Wei Ze, Li Houpu. Practical methods for calculating geodetic distance between two points in view of geodetic height[J]. *Ship Electronic Engineering*, 2011, 31(8): 52-55.
- [12] 刘英贤. 公式法求大圆始航向的探讨[J]. *大连海事大学学报*, 1997, 23(4): 25-28.  
Liu Yingxian. Analytical method for determining the initial course of great circle track [J]. *Journal of Dalian Maritime University*, 1997, 23(4): 25-28.
- [13] 黄晓颖,边少锋. 大地问题的截面椭圆弧长新解[J]. *海洋测绘*, 2007, 27(1): 21-23.  
Huang Xiaoying, Bian Shaofeng. New solution of the geodetic problem by the sectional ellipse[J]. *Hydrographic Surveying and Charting*, 2007, 27(1): 21-23.