

基于航线对象方法的四维航迹建模与优化

杜文彬,王 超

(中国民航大学 空中交通管理学院,天津 300300)

摘要:基于航迹运行是新一代空管运行的发展趋势,因此,为准确和高效地描述民航飞行航迹,提出了基于航线对象方法的7种航迹段模型。按照飞行计划、管制指令和导航设备的地理分布,搭建了水平航迹,对垂直剖面建模所需的重要参数(爬升率、下降率、推力、巡航马赫数等)进行了简单的推算和优化,可以生成完整的4D航迹。最后通过离场队列飞机的仿真算例与实际飞行数据进行比较,结果表明该建模方法可准确描述航空器各点的空间位置和时间,能较好地描述终端区的动态航迹,对交通流调控的实用化有积极的作用。

关键词:航线对象;4D航迹;水平航迹;垂直剖面;飞行管理系统

中图分类号:V355

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2012)08-0249-05

4D Trajectory Model and Optimization Based on Path Object

DU Wen-bin, WANG Chao

(College of Air Traffic Management, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: Trajectory based operation was the development trend of new generation air traffic control operation. In order to describe the trajectory of civil aircrafts precisely and efficiently, the seven new trajectory model based on path object was proposed. Horizontal trajectories were built depending on the flight plan, control instruction and geographical distributing of navaid, the requisite main parameter, including ascension rate, descent rate, thrusting and cruise Mach, for vertical profiles modeling were simplified reckoned and optimized, a whole 4D trajectory was obtained. Finally, a comparison between a departure simulation data with the actual flight data shows that the 4D trajectory model based on path object can describe the spacial position of the aircrafts accurately, and resolves the trajectory prediction problems that exist in terminal area describe dynamic trajectory of the terminal area better. It has positive effect on the practical traffic flow adjusting and controlling.

Key words: path object; 4D trajectory; horizontal trajectory; vertical profile; flight management system

0 引言

基于航迹运行(Trajectory Based Operation, TBO)^[1]是新一代空管运行的发展趋势,因此,对航迹的准确预测、描述以及空地数据交换是未来空中交通安全运行的重要保障。飞行管理系统(Flight Management System, FMS)^[2]集导航、制导、控制与数据传输为一体,是实现高效率空地协同管理的基础。

国内外对4D航迹的研究存在以下不足^[3]:

- (1)建模过程相对复杂、耗时长;
- (2)无法精确对自身的4D航迹进行实时地建模。

针对以上问题,笔者提出了基于航线对象思想的4D航迹建模方法,以提高管制员和飞行员对飞行器4D航迹实时报告与监控的效率。

文中基于航线对象的思想,构建了7种基本航迹段,并使用这些航迹段及其组合对飞行程序建模。其中,包括的飞行程序有离场程序、仪表进近程序、标准仪表进场程序和等待程序。

1 航线对象

飞行航迹均由简单直线段、转弯段和圆弧段及其组合构成,分别定义这三种类型的航迹构型,并按照规定的顺序和触发条件将其搭建起来,就可以得到不同的飞行航迹。航线对象(path object, PO)^[4]是美国学者 John N. Barrer 于2000年提出的一种简单的航迹描述方法,它可以简化飞行员和FMS的接口,为终端区运行而提供动态生成的RNAV指令。PO以最简单的点信息为单位元素,构造了从起飞、巡航、进近到着落等飞行程序,再将这些飞行程序按照规定的顺序组合,

收稿日期:2011-11-30;修回日期:2012-03-02

基金项目:科技部科技支撑计划(2011BAH24B08);中国民航大学研究生科技创新基金项目(YJSCX2011-04);中国民航大学科研启动基金项目(2011QD01X)

作者简介:杜文彬(1986-),男,安徽芜湖人,硕士,研究方向为交通信息工程及控制、飞行管理系统;王超,副教授,硕士研究生导师,研究方向为交通信息工程及控制、交通运输规划与管理。

就可以产生一条完整的飞行航迹。基本的 PO 包含了三种基本构件:直线段、转弯段、圆弧段。

在航迹建模时,通过 FPL 报文和管制员下达的指令,将飞行航迹分成单个的航迹段,这些航迹段包含的数据信息有:经纬度、高度、速度、航向、时间,再将这些航迹段根据时间顺序一一连接。

2 水平航迹模型

从典型的水平飞行航迹来看,航空器通常沿直线从一个航路点飞向另一个航路点,然后在后一航路点或该点附近转弯并跟踪新的航向。其中,航空器会执行的基本指令有五类:平飞、上升高度、下降高度、保持匀速、按指定速度,会使用到的导航设备有四类:DME、VOR、NDB、GPS。文中根据 PO 的点信息思想,航空无线电公司(Aeronautical Radio, Inc)的 ARINC 424-18 标准^[5],并结合管制指令和导航设备的类型,提出了 7 种基本的水平航迹段模型。

(1)点(PPOINT)模型:表示定位点,用于定义离场程序、进场程序、进近程序或航路。该航迹段的描述信息包括纬度、经度、飞越高度、过点速度、过点时间等。PO 表达式为 $P[X, Y, Z, V, T]$ 。

(2)直线段(LINE)模型:表示航空器沿着两个航路点之间的大圆航线(或者罗盘指示方位线)进行飞行。可以引导飞机从上一航段结束点飞到本航段结束点。PO 表达式为 $L[P_1, P_2]$ 。 P_1 为直线段航迹的起始点, P_2 为终止点。

(3)转弯段(TURN)模型:表示飞机沿着给定航迹角飞行,经过转弯,飞到给定航路点。PO 表达式为 $T[P_1, P_2, MC_1, MC_2]$,其中 P_1 为起始转弯点的位置, P_2 为终止转弯点的位置, MC_1 为切入转弯段之前的磁航迹角, MC_2 为从转弯段改出之后的磁航迹角。转弯段建模的计算过程可以参考文献[6]。

(4)点-高度(PPOINT-ALTITUDE)模型:表示飞机从某一航路点开始,沿着给定航迹角或航向角,飞到规定高度为止。通常出现在离场程序或复飞程序中。PO 表达式为 $PA[P, ALT, MC, RATE]$ 。 P 为爬升/下降高度起始点, ALT 为目标高度, MC 为给定磁航迹角, $RATE$ 为爬升/下降率。

(5)点-距离(PPOINT-DISTANCE)模型:表示飞机从某一航路点开始,沿着给定航迹角,飞行指定距离后结束。PO 表达式为: $PD[P, DIS, MC]$ 。 P 为该航迹段的初始点, DIS 为计划的飞行距离。

(6)点-测距仪(PPOINT-DME)模型:表示飞机沿着给定航迹角,飞到某一 DME 台的指定 DME 弧上,或者沿着固定 DME 弧飞到下一个航路点。由于起始点和飞行方式的不同,点-测距仪模型分为以下两种

情况:

第一种:表示飞机从某一航路点开始,沿着给定航迹角,飞到某一 DME 台的指定 DME 弧上。PO 表达式为: $PDA[P_1, P_2, R, MC]$,其中 P_1 为起始航路点, P_2 为 DME 的位置, R 为 DME 弧的半径。

该点-测距仪(PPOINT-DME)问题可以描述成:已知初始条件 $[P_1(x_1, y_1), P_2(x_2, y_2), R, MC]$, x_1 (纬度)和 y_1 (经度)为航空器瞬时位置, x_2 (纬度)和 y_2 (经度)为 DME 信标台的地理位置,该信标台的 DME 弧长度为 R 海里,航空器从 P_1 位置出发,以磁航迹角 MC 向台飞行,并在指定 DME 弧上终止该航迹段的飞行:

$$\begin{cases} (x - x_2')^2 + (y - y_2')^2 = R^2 \\ \tan(MC) \times x + b = y \end{cases} \quad (1)$$

其中, (1)式中 $b = y_1' - \tan(MC) \times x_1'$,通过计算二元二次方程组,可以得到一组或者两组解。当只有一组解时,这组解就是该航迹段终止点的经纬度;当有两组解时,只需要对比所得解到 $P_1(x_1, y_1)$ 点的距离,取其中较小者为航迹段终止点即可。这里需要注意的是,计算过程中的 $P_1(x_1', y_1')$ 与 $P_2(x_2', y_2')$ 是通过使用墨卡托投影得到的位置点信息。

第二种:表示飞机从上一段结束位置开始,沿着固定的 DME 弧,飞到下一航路点。PO 表达式为: $PDB[P_1, P_2, P_3, R]$,其中 P_1 为飞机切入 DME 弧的位置, P_2 为 DME 的位置, P_3 为下一航路点的位置, R 为 DME 弧的半径。

(7)点-甚高频全向信标台(PPOINT-VOR)模型:表示飞机从某一航路点开始,沿着给定航迹角,飞到并切入某 VOR 台的指定径向线上。PO 表达式为: $PV[P_1, P_2, RAD, MC]$,其中 P_1 为起始航路点的位置, P_2 为 VOR 台的位置, RAD 为指定的径向线半径。

3 垂直剖面建模与优化

飞行管理系统对于爬升、巡航、下降的飞行剖面计算,是基于成本指数、巡航高度、飞机总重、阻力因素等数据进行的^[7]。因此,文中对巡航段的优化,是以飞机为受控对象的状态方程作为基本约束条件,选定性能参数(推力、高度、速度等)来达到预先拟定的目标(直接营运成本最小);对爬升段与下降段的优化,是以飞机 TEM (Total-Energy Model)模型为基础,使用 BA-DA 性能数据库的数据来计算发动机推力和空气阻力,从而实现了对飞行活动的建模与优化。

3.1 巡航段

巡航段的性能优化主要是优化巡航速度和巡航高度,使巡航成本最小。文中使用无侧滑质点运动方程,采用二十世纪五十年代 Rutowski 提出的飞机能量状态的概念,对飞机模型进行简化;再采用最优控制理论

中的极小值原理,得到巡航段成本计算方法:

$$\psi(E_c)=\min_{V_c}\frac{C_f\dot{f}+C_t}{V_c+V_w}\tag{2}$$

(2)式中, C_f , C_t 为单位质量燃油的成本和单位时间的费用; \dot{f} 为燃油消耗率; V_c 为巡航速度; V_w 为风速; $\psi(E_c)$ 为最优巡航成本。

根据成本指数 CI 的定义、燃油消耗与发动机推力的关系,(2)式的优化模型可以表示为:

$$\min C_T=\min\frac{c_{fc}(\frac{c_{isf0}+a\frac{m}{m_0}+b\frac{H_0-H}{H_0}}{g}T+100CI)}{V_t}\tag{3}$$

(3)式中, c_{fc} 为单位燃油价格; c_{isf0} 为初始的燃油消耗率; T 为发动机推力; g 为地球重力加速度; V_t 为实际空速风速; m_0 为飞机初始重量; m 为飞机重量; a 、 b 分别为飞机质量、高度修正参数; H_0 为飞机初始高度; H 为飞机高度。

由(3)式可以得知,巡航段的性能优化主要是优化巡航速度 V_t 和巡航高度 H ,使巡航成本 C_T 最小。

首先求解推力 T ,因为巡航段飞行处于稳态,由巡航力平衡关系(W 为飞机巡航重量):

$$\begin{cases} T-D=0 \\ L-W=0 \end{cases}\tag{4}$$

其中,推力 T 可以通过阻力 D 求解,阻力 D 为:

$$D=\frac{1}{2}\rho V_t^2 SC_D=\frac{1}{2}\rho V_t^2 S(C_{D0}+KC_L^2)=T\tag{5}$$

ρ 为大气密度; S 为参考机翼面积; V_t 为空速; C_D 、 C_L 分别为阻力、升力系数; C_{D0} 为寄生阻力系数; K 为诱导阻力因子。

结合式(3)~(5),得到巡航段优化目标:优化速度 V_t ,飞机质量 m 及所在高度 H 使巡航成本 C_T 最小。有关巡航段优化的详细公式推导,可以参见文献[8,9]。

3.2 爬升段与下降段

TEM (Total-Energy Model) 模型将航空器看作是一个简化的质点模型,建立作用于飞机上的外力功率和飞行器动能及势能的变化率之间的等式关系:

$$(T-D)V_{TAS}=mg\frac{dh}{dt}+mV_{TAS}\frac{dV_{TAS}}{dt}(\frac{dh}{dt})\tag{6}$$

根据式(6),在推力、速度、升降率三者任知其二的情况下可计算出第 3 个量,保持一定的速度和推力设置是爬升/下降过程中普遍的控制方式。

推导爬升/下降率:

$$\frac{dh}{dt}=\frac{(T-D)V_{TAS}}{mg}[1+(\frac{V_{TAS}}{g})(\frac{dV_{TAS}}{dh})]^{-1}\tag{7}$$

定义能量分配因子 $f\{M\}$,一个关于马赫数的函数:

$$f\{m\}=[1+(\frac{V_{TAS}}{g})(\frac{dV_{TAS}}{dh})]^{-1}\tag{8}$$

则式(6) 可以表示为:

$$\frac{dh}{dt}=[\frac{(T-D)V_{TAS}}{mg}]f\{M\}\tag{9}$$

通过对式(9) 中 $f\{M\}$ 的不同赋值,可以得到航空器在不同的高度范围,选择不同爬升/下降方式时的飞行状态。有关 $f\{M\}$ 的赋值,参见文献[10]。

4 飞程序及转换条件

航迹段建模的目的是组合成飞程序,飞程序分 5 类,分别是:离场程序、标准仪表进场程序、仪表进近程序、等待程序和复飞程序^[11]。文中使用 7 种航迹段模型,将此 5 类飞程序模型化,具体的航迹段组合见表 1。

表 1 航迹段的组合方式

飞程序	开始航迹段	结束航迹段
SID 跑道过渡	P,T,PA,PD,PDA,PV	PDB,T,L
SID	P,T,PA,PD,PDA,PV	P,L,PDB,T
SID 航路过渡	P,PA,PD,PDA	PDB,T,L
STAR 航路过渡	P,PD,PDA	PDB,T,L
STAR	P,PD,PDA	PDB,T,L,P
STAR 跑道过渡	P,PD,PDA	PDB,T,L
进近过渡	P,PD,PDA	PDB,T,L
进近程序	P	T,L
复飞程序	L,T,PA,PD,PDA,PV	PDB,T,L
等待程序	P,L	T,PDA,L,PA,PV

如表 1 所示,每个飞程序由开始航迹段和结束航迹段组合而成,例如某机场离场程序中的跑道过渡程序是:从跑道端口起飞至 1000ft,再沿特定的 DME 弧,飞到下一航路点。该跑道过渡程序的开始航迹段就为 PA,结束航迹段就为 PDB。

设定转换条件,通过对某些参数的监控,使飞程序可以在达到特定条件时可以自动转换。需要监控的参数主要为导航台信息、航路点信息、管制员指令和航空器飞行状态信息。具体的转换条件和监控参数见表 2。

5 仿真实例

以西安咸阳机场 05 号跑道为例进行仿真,生成 4D 航迹的输入源包括:导航台信息、报告点信息、航空器型号、飞行状态信息等。由 FPL 与航图可得到包括地速、航向、高度、位置,航空器性能信息由 Eurocontrol

表 2 飞行程序转换条件和监控参数

飞行程序	转换条件	监控参数
SID 跑道过渡	从跑道端口起飞至某一特定高度,或者飞至某一特定导航台	P、ALT、MC、RAD、DIS、R
SID	高度至离场高度(10000ft),表速 CAS 达到 250kt,且飞至某一特定导航台	P、ALT、MC、RAD、DIS、R、V
SID 航路过渡	高度达到巡航高度	P、ALT、MC、RAD、DIS、R
STAR 航路过渡	高度从巡航高度下降至 10000ft,飞至某一特定导航台	P、DIS、MC、RAD、R
STAR	等表下降后的平飞减速(应 ATC 要求),至 250kt,且飞至某一特定导航台	P、DIS、MC、RAD、R、V
STAR 跑道过渡	从某一特定导航台至 IAF 之前 46km	P、DIS、MC、RAD、R
进近过渡	IAF 之前 46km 至 IAF	P、DIS、MC、RAD
进近程序	IAF 至复飞点	P、MC、R
复飞程序	由复飞点至,开始另一次进近程序;或回至指定的等待航线;或重新开始航线飞行	R、P、MC、DIS、RAD、ALT、
等待程序	等待至 ATC 要求	R、P、MC、DIS、RAD

的 BADA 数据库得出。离场程序为咸阳机场 05 号跑道 HO-01 号,即由离场走廊口长武(HO),选择第 1 号离场程序(HO-01D),结合咸阳机场离场程序数据库,航迹输出结果见表 3。

该仿真实例中,用于水平航迹建模的航迹段模型有:点(POINT)模型、转弯(TURN)模型、点-高度(POINT-ALTITUDE)模型、点-距离(POINT-DISTANCE)模型。

该算例选择了西安咸阳 05 跑道的一条离场程序进行仿真,生成的水平轨迹、垂直剖面优化^[12]如图 1~3 所示。文中提出的基于航线对象思想的四维航迹建模方法是存在误差的,本算例中时间的计算是从飞机过 SIA 导航台时开始计时,完成整个离场程序所需时间为 1013s,与通过观测得到的实际飞行数据 974s 相比少 39 s,误差的主要原因是大气数据、导航设备的性能误差以及实际飞行中飞行员的操作误差等。

6 结束语

通过研究PathObject对飞行程序描述的核心思

表 3 离场程序航迹输出结果

机型		B737-300					
跑道		ZLXY 05 RWY					
离场程序(HO-01D)		51°航向爬升至 1000 米,转弯段,过 GF 导航台时高度 1800 米,保持航向 312°,过报告点时高度 2100 米,保持航向 318°,过导航台 HO 时高度 4200 米					
标准转弯率		3°/S					
航迹特征点	时间(/s)	爬升率 (m/s)	地面距离 (m)	表速(km/h)	平面坐标 系 X 坐标	平面坐标 系 Y 坐标	剩余推力 (N)
SIA 导航点	0	0	0	0	0	0	6166
300 米	29.1	10.3	2670	330			
600 米	27.5	10.9	2645	346			
1000 米	34.2	11.7	3514	370	1350.91	4316.21	
转弯段	47	0	5222	400	1047.64	5958.9	5954
1200 米	15	13.3	1767	423			
1500 米	21.6	13.9	2763	461			
1800 米	22	13.7	2817	463			
GF 导航点	78.7	0	10122	463	-12562.53	11843.92	5259
2100 米	22.4	13.4	2880	463			
报告点	180	0	23120	463	-66626.44	27596.66	
2400 米	23	13	2958	463			
2700 米	24	12.7	3087	463			5033
3000 米	24	12.7	3087	463			
3300 米	24	12.7	3653	548			
3600 米	24	12.7	3826	574			
3900 米	25.4	11.8	4049	574			3275
4200 米	26.3	11.4	4192	574			
HO 导航点	364.8	0	58149	574	-91292.01	84150.47	

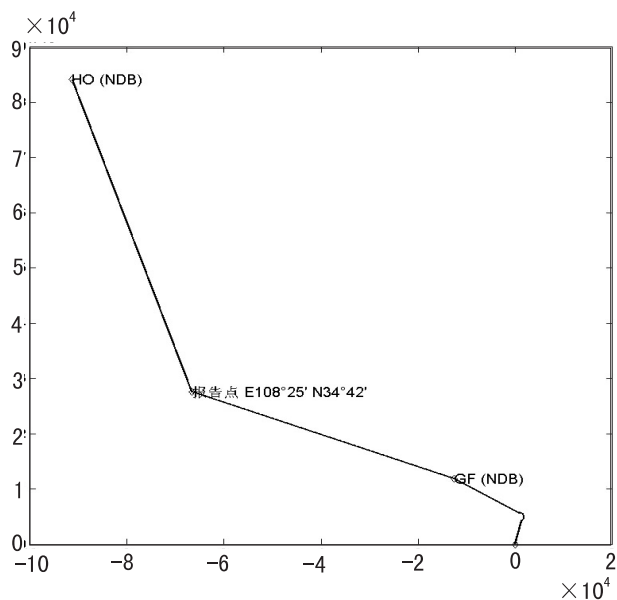


图1 离场程序的水平轨迹

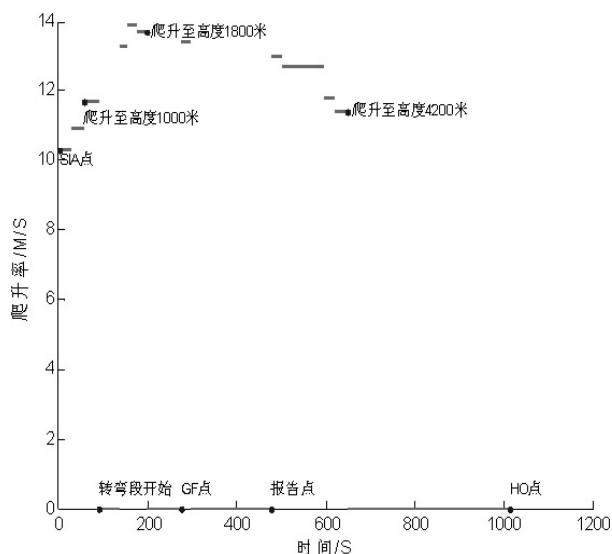


图2 离场程序爬升率

想,分析了基于飞行模型的4D航迹描述方法,提出了使用7种水平航迹段与垂直剖面优化来搭建4D航迹的方法,并使用Matlab对4D航迹进行建模。仿真结果表明文中所提出的方法可以快速、准确、实时地描述飞机到达各个导航台的时间与飞行状态。4D航迹的准确描述是新一代飞行管理系统的核心组成,它为面向空地一体化协同运行提供了基础。为了满足RNP的技术需下一步将建立符合RNP标准的航迹段模型,

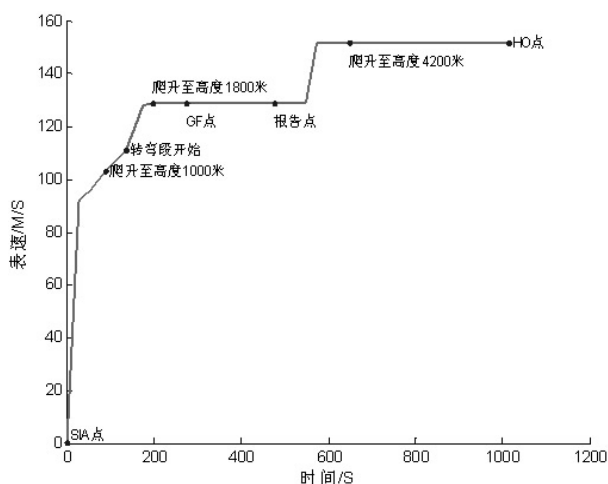


图3 离场程序表速

进一步提高4D航迹建模的时效性。

参考文献:

- [1] 伊群. 美国新一代空中交通管理系统运行概念[J]. 中国民用航空, 2007, (8): 27-31.
- [2] 吴德平, 袁信, 郭锁凤. 飞行管理系统导航功能分析[J]. 航空学报, 1992, 13(5): 339-343.
- [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.
- [4] Barrer J N. Integrating the Cockpit With Air Traffic Management: The Concept of Path Objects [C]//Europe Air Traffic Management. Italy (Seminar Napoli): [s. n.], 2000.
- [5] Aeronautical Radio. INC. Navigation System Data Base ARINC Specification 424-18[S]. USA: [s. n.], 2005.
- [6] 宋柯. ARINC424 终端区程序编码解析与轨迹还原[J]. 空中交通管理, 2010, (8): 50-53.
- [7] 马锐. 飞行管理系统性能优化与控制研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2006.
- [8] 胡寿松. 自动控制原理[M]. 第五版. 北京: 科学出版社, 2007.
- [9] 王素晓. 民用飞机巡航段航迹规划和制导方法研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2011.
- [10] Eurocontrol Experimental Centre. User manual for the base of aircraft data (BADA) revision 3.6 [OL/DB], 2008-12-15.
- [11] 戴福青. 飞行程序设计[M]. 天津: 天津科学技术出版社, 2000.
- [12] 王大海. 先进飞行管理系统中最优飞行剖面与4D导航研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 1996.

基于航线对象方法的四维航迹建模与优化

作者: [杜文彬, 王超](#)
作者单位: [中国民航大学空中交通管理学院, 天津300300](#)
刊名: [计算机技术与发展](#)
英文刊名: [Computer Technology and Development](#)
年, 卷(期): 2012(8)

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_wjtz201208066.aspx