

11-20-2019

Quantity Optimization of Aircraft Ground Deicing Equipment Based on Flight Dynamics

Bin Chen

Ground Support Equipment Research Base of Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;

Liwen Wang

Ground Support Equipment Research Base of Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Quantity Optimization of Aircraft Ground Deicing Equipment Based on Flight Dynamics

Abstract

Abstract: Flight delays and deicing equipment parameter optimization questions were studied aiming at two kinds of typical airport. *The formation mechanism of deicing flight delay queue was studied, and the flight delay queue model was proposed corresponding to the departure dynamics of triangle and parabolic shape function. An optimization model of deicing nozzle quantity demand for two typical flight departure dynamics was established aiming at minimizing the flight delay and deicing cost.* The nozzle quantity demand optimization model was simulated and verified using deicing flight dynamic data of Beijing International Airport and Harbin Taiping Airport. Simulation results are close to actual data, and the error is less than 8.1%. It shows the accuracy of the models, which provides a reference for the optimization of the aircraft deicing nozzle.

Keywords

flight deicing delay, aircraft deicing on ground, deicing equipment, parameter optimization, minimum delay cost

Recommended Citation

Chen Bin, Wang Liwen. Quantity Optimization of Aircraft Ground Deicing Equipment Based on Flight Dynamics[J]. Journal of System Simulation, 2019, 31(4): 757-764.

基于航班动态的飞机地面除冰装备数量优化

陈斌, 王立文

(中国民航大学航空地面特种设备民航研究基地, 天津 300300)

摘要: 针对两类典型机场航班除冰延误及除冰装备参数优化问题开展研究。研究了除冰航班延误队列形成机理, 提出了离港动态为三角形和抛物线形函数的除冰航班延误队列模型, 以航班延误和除冰成本最小为目标, 建立了两类典型航班离港动态的除冰喷嘴数量需求优化模型。以首都国际机场和哈尔滨太平机场除冰航班动态实测数据, 对除冰喷嘴数量需求优化模型进行了仿真验证, 仿真结果和实际数据接近, 误差在 8.1% 以内。验证了模型的准确性, 为类似机场飞机除冰喷嘴数量需求优化提供了参考依据。

关键词: 航班除冰延误; 飞机地面除冰; 除冰装备; 参数优化; 最小成本

中图分类号: V351.392 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2019) 04-0757-08

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.17-0119

Quantity Optimization of Aircraft Ground Deicing Equipment Based on Flight Dynamics

Chen Bin, Wang Liwen

(Ground Support Equipment Research Base of Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: Flight delays and deicing equipment parameter optimization questions were studied aiming at two kinds of typical airport. The formation mechanism of deicing flight delay queue was studied, and the flight delay queue model was proposed corresponding to the departure dynamics of triangle and parabolic shape function. An optimization model of deicing nozzle quantity demand for two typical flight departure dynamics was established aiming at minimizing the flight delay and deicing cost. The nozzle quantity demand optimization model was simulated and verified using deicing flight dynamic data of Beijing International Airport and Harbin Taiping Airport. Simulation results are close to actual data, and the error is less than 8.1%. It shows the accuracy of the models, which provides a reference for the optimization of the aircraft deicing nozzle.

Keywords: flight deicing delay; aircraft deicing on ground; deicing equipment; parameter optimization; minimum delay cost

引言

飞机地面积冰是导致航班延误、影响飞行安

全的重要诱因, 飞机地面除冰是克服上述问题的有效方法^[1-2]。随着飞行区面积的扩大、航班起降密度增加, 冰雪天气下的飞机地面除冰保障效率和成本成为该行业关注的热点和焦点。为了提高飞机地面除冰效率, 多个研究人员从多个侧面进行了探索和研究, Norin 等^[3]提出了除冰车调度方法, 企图使除冰车地面行走时间和航班等待时间最小化, 然而, 冰雪天气下由于天气原因很难提



收稿日期: 2017-03-16 修回日期: 2017-05-29;
基金项目: 科技部科技支撑计划项目子课题 (2012BAG04B02), 中央高校基本科研业务费中国民航大学专项(3122016B004);
作者简介: 陈斌(1974-), 男, 陕西凤翔, 博士, 副研究员, 研究方向为机场地面运行控制与保障技术。

<http://www.china-simulation.com>

• 757 •

前制定出需要除冰航班的调度计划, 未获得成功应用。Lee 等^[4]在底特律机场研发了针对 2 个除冰坪的飞机除冰时长决策工具, 针对给定机型、天气和机坪占用等信息, 该工具可以计算航班的除冰消耗时间, 除冰公司使用该工具调度航班使得除冰消耗时间减少。Mao 等^[5]提出了基于 Agent 的飞机地面除冰调度模型, 该模型中将每一架飞机作为自组织的利益体, 针对传统的集中调度存在的不能处理不同 Agent (飞机) 的除冰时间, 提出由航空公司决定集中除冰的优化时间, 引入竞争与惩罚机制, 使每一个 Agent (飞机) 获得最小的除冰时间。该方法已经在底特律机场获得应用。同时, 部分研究人员^[6-7]通过仔细研究机场除冰全过程, 建立机场除冰收益函数, 借鉴排队论^[8-9]思想, 在飞机地面除冰运行中研究了航班调度和机场收益问题, 在机场固有设施的不变情况下最终提高了机场除冰收益。李兵等^[10]以提高飞机除冰资源利用效率为目标, 对机场飞机除冰过程调度理论和方法进行研究, 采用混合调度算法实现除冰资源利用效率最大化, 能够更好地提升现有人工调度方法的资源利用效率。邢志伟等^[11-12]针对北京首都国际机场提出了单个除冰坪的多 Agent 飞机除冰调度模型, 建立了航空公司、除冰坪和机场多 Agent 优化模型。该方法在一定程度上可以减少航空公司航班延误, 2005 年开始在北京首都国际机场获得应用。

上述研究成果分别从除冰作业过程设备调度、运行路径优化、除冰作业收益和除冰作业延误方面对除冰保障效率和成本问题进行研究, 遗憾的是未发现考虑航班动态的除冰装备需求数量控制和优化问题的研究。本文分析了飞机除冰和除冰航班延误的形成机理, 结合飞机集中除冰作业流程提出了考虑航班离港动态的飞机地面除冰喷嘴数量需求优化模型, 研究了最小延误和除冰成本时除冰喷嘴数量需求问题, 为飞机地面除冰保障资源配备提出新参考思路。

1 飞机集中除冰流程及除冰服务率

1.1 飞机集中除冰流程

飞机集中除冰以提高飞机地面除冰效率和安全裕度为目标, 在跑道端头选择一块特定的除冰坪, 配置多个除冰机位和除冰装备提供除冰作业服务。当离港航班机组向机场指挥调度中心提出除冰服务申请后, 机场根据机型和申请的先后次序自动为离港航班分配相应的除冰坪和除冰机位, 等待飞机滑行至该区域进行除冰^[13]。待飞机完成除冰作业后, 滑出除冰坪等待塔台起飞指令, 如果等待起飞指令时间超出了除冰液的保持时间, 航班则需要重新排队等待二次除冰服务。图 1 为飞机集中除冰流程示意图。

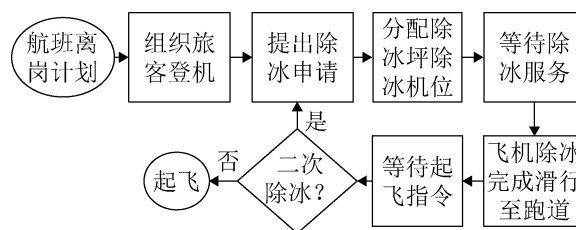


图 1 飞机地面集中除冰流程

Fig. 1 Aircraft ground concentration deicing process

如图 1 所示, 根据航班离港计划组织旅客登机完成后, 由机组人员或所属航空公司向机场调度指挥中心提出除冰服务申请。经过调度指挥中心的信息确认后, 将根据申请航班的飞机型号、离港计划时刻表等信息, 为该航班分配相应的除冰坪和除冰机位, 飞机前往指定的机位接受除冰服务。一般情况下每个除冰坪都会设置多个除冰机位和除冰喷嘴, 如果喷嘴设置数量不合理, 则使得除冰时间延长, 加重航班延误, 极易引起二次结冰, 进而导致更大的航班延误。飞机集中除冰根据飞机机型、雪情、离港航班动态和除冰液温度等参数合理调整除冰喷嘴数量, 可以在很大程度上减少由于飞机除冰导致的离港航班大面积延误问题。

1.2 除冰服务率

1) 除冰条件假设

根据集中除冰流程, 便于模型建立和相关计算, 需要做如下假设:

假设 1: 离港计划的航班中, 所有的离港航班飞机都进行除冰服务申请;

假设 2: 假设机场除冰区域多个除冰坪的总长度之和为 L 米, 除冰装备沿着除冰坪之间行驶的线路做线性假设, 将非直线的除冰坪近似成直线;

假设 3: 申请除冰的高峰期期间, 假设所有除冰机位一直被飞机占用, 且所有飞机型号和除冰坪大小相同。

2) 除冰服务率定义

设 \bar{v} 是除冰喷嘴的平均移动速度, 则除冰喷嘴沿着除冰机位平均行驶时间 \bar{t}_t , 得:

$$\bar{t}_t = \frac{L}{\bar{v}} \quad (1)$$

每架飞机平均除冰时间 \bar{t}_{td} 包括除冰喷嘴准备时间 \bar{t}_s 和除冰消耗时间 \bar{t}_d , 得:

$$\bar{t}_{td} = \bar{t}_s + \bar{t}_d \quad (2)$$

所以, 每个除冰喷嘴工作时间 \bar{T} :

$$\bar{T} = \bar{t}_t + \bar{t}_{td} \quad (3)$$

假设除冰液加注时间为 \bar{t}_{refl} , 满载情况下每个除冰喷嘴平均能够保障 \bar{a} 架飞机除冰, 则每个除冰喷嘴在单位时间内能够完成除冰的飞机架次为该喷嘴的平均除冰服务率 $\bar{\mu}_1$, 即:

$$\bar{\mu}_1 = \frac{\bar{a}}{\bar{T}a + \bar{t}_{refl}} \quad (4)$$

集中除冰时多个除冰喷嘴同时作业, 设 n_d 个除冰喷嘴组成一个除冰喷嘴保障编队, 该除冰喷嘴编队的总除冰服务率为 $\bar{\mu}$ 架次/小时, 得出:

$$\bar{\mu} = n_d \cdot \bar{\mu}_1 = n_d \cdot \frac{\bar{a}}{\bar{T}a + \bar{t}_{refl}} \quad (5)$$

2 除冰航班延误分析及形成机理

2.1 除冰航班离港动态及延误特征

枢纽机场和干线机场的冰雪天航班延误带来的问题最明显, 而两类机场航班动态和流量完全不同, 为了使冰雪天航班延机理具有适度普遍性, 本

文选取首都国际机场和哈尔滨太平国际机场作为研究对象。图 2 为 2015 年冬季冰雪天首都国际机场和哈尔滨太平国际机场的航班离港动态的实际数据分布, 其中横坐标是时间轴, 纵坐标是单位时间申请除冰离港的航班数。

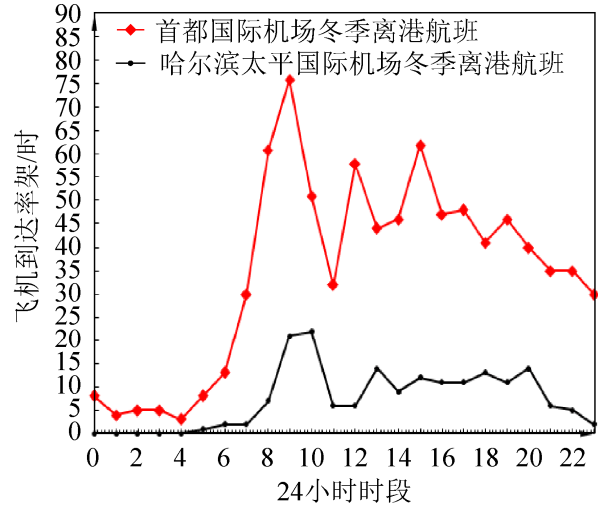


图 2 两个机场离港航班动态信息
Fig. 2 Dynamic information of departure flights at two airports

由于飞机除冰产生的总延误主要集中在离港航班的高峰时段, 只要离港高峰时段除冰保障满足要求, 离港低谷时段也满足要求。如图 2 所示飞机排队等待除冰产生的延误主要分布在图中离港航班动态的第一个峰值处。文中以图 2 中 06:00-12:00 时段数据作为分析除冰航班延误和保障的样本, 对除冰航班离港动态进行除冰延误分析。

对 06:00-12:00 时段的除冰航班动态进行最小二乘拟合, 得到图 3 的航班离港动态分布曲线。枢纽机场和干线机场的航班离港动态呈现不同的分布态势, 拟合后形成的离港动态曲线差异较大。北京首都机场这种国际枢纽机场, 其高峰时段的离港航班动态可以近似成三角函数, 而哈尔滨太平国际机场这种区域干线机场, 其高峰时段的离港航班动态可近似成抛物线函数。

2.2 除冰航班延误形成机理

将图 3 第一个峰值处离港动态抽象成图 4 所示

的除冰航班延误示意图,可知除冰航班离港动态是关于时间 t 的函数,此处用 $\lambda(t)$ 表示, μ 表示除冰喷嘴的总服务率。在 $t < t_1$ 时刻,离港率小于除冰喷嘴的服务率,除冰航班将不需要排队等待,没有除冰延误。在 $t_1 < t < t_2$ 时刻,离港率大于除冰喷嘴的服务率,此时除冰航班出现除冰等待延误队列,且随着时间的推移,到航班离港高峰时刻,该航班延误队列继续增加。随着离港航班数量减少,除冰需求逐步减少,但除冰航班仍然需要排队等待,除冰等待延误队列继续。在 $t_2 < t$ 时刻,航班离港率小于除冰服务率时,除冰航班等待队列开始逐渐减小并持续一段时间,在 $t_3 < t$ 时,除冰航班等待队列彻底消失,后续的除冰航班也不需要排队等待除冰。可见除冰航班延误主要由单位时间内申请除冰离港的航班架次(动态)与除冰中心的服务率决定。

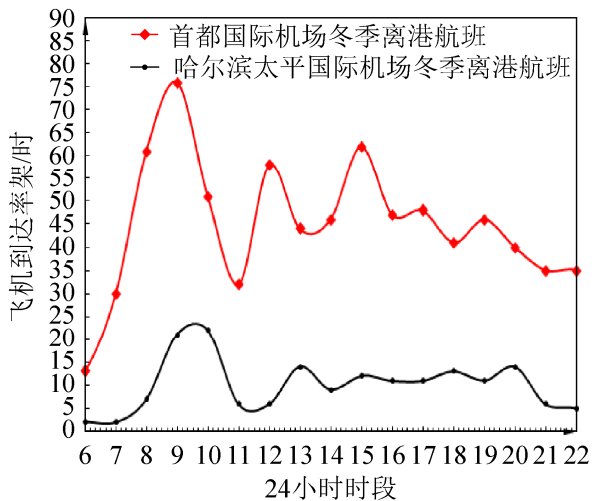


图 3 航班离港动态分布曲线

Fig. 3 Dynamic distribution curve of flight departure

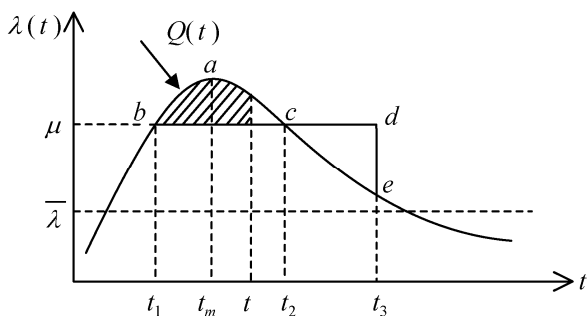


图 4 除冰航班延误示意图

Fig. 4 Sketch map of deicing flight delay

此处定义在任意 t 时刻接受除冰的航班等待队列 $Q(t)$ 的航班架次为:

$$Q(t) = \int_{t_1}^t [\lambda(t) - \mu] dt \quad t_1 < t < t_3 \quad (6)$$

t 时刻的除冰航班等待队列是在 t_1 和 t 时刻的航班离港曲线和服务率之间的区域。根据图 4 的除冰航班延误示意图可知,除冰等待队列的形成等于除冰等待队列的消散,即在 (t_1, t_2) 时间内的(abc)区域面积等于 (t_2, t_3) 时间内的(cde)区域面积。即:

$$\int_{t_1}^{t_2} [\lambda(t) - \mu] dt = \int_{t_2}^{t_3} [\mu - \lambda(t)] dt \quad (7)$$

据此可以得出除冰航班排队队列的消失时刻 t_3 。

3 航班延误和除冰装备需求优化模型

3.1 除冰航班延误模型

定义飞机除冰总延误为 W , 根据除冰航班等待队列定义,可得:

$$W = \int_{t_1}^{t_3} Q(t) dt \quad (8)$$

结合式(6),进一步得出离港航班中申请除冰服务的航班总延误(航班架次/时):

$$W = \int_{t_1}^{t_3} Q(t) dt = \int_{t_1}^{t_3} \left\{ \int_{t_1}^t [\lambda(t) - \mu] dt \right\} dt \quad (9)$$

从上述定义可看出,除冰航班总延误与航班离港动态和除冰服务率相关,不同的离港动态函数,计算后形成的总延误也完全不同。为了提高除冰航班总延误准确性和代表性,以北京首都国际机场和哈尔滨太平国际机场离港动态作为典型研究对象,分别按照离港高峰时段为抛物线函数和三角形函数分析。

1) 离港动态为抛物线函数的总延误

结合离港航班函数曲线以及开口向下的抛物线形特点,可将哈尔滨国际机场除冰航班离港函数 $\lambda(t)$ 假设为式(10)。

$$\lambda(t) = \lambda_m - \alpha(t - t_m)^2 \quad (10)$$

式中: $\lambda(t)$ 表示 t 时刻的除冰航班离港函数; t_m 为离港航班数为最大值的峰值时刻,该峰值时刻对应的离港航班峰值为 λ_m ; α 为和离港航班峰值时段

持续时间 T_0 相关的系数。 T_0 为航班离港函数 $\lambda(t)$ 超过平均离港航班数量 $\bar{\lambda}$ 所持续的时间。图 5 为离港动态为抛物线函数的示意图。

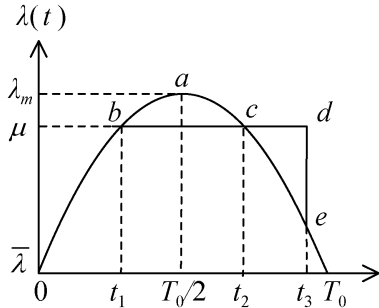


图 5 离港动态的抛物线函数示意图

Fig. 5 Sketch of parabola function of departing port

结合抛物线函数特点, 则式(10)进一步化为:

$$\lambda(t) = \lambda_m - \alpha(t - T_0/2)^2 \quad (11)$$

当 $t=0$ 和 $t=T_0$ 时, 得出

$$\alpha = 4(\lambda_m - \bar{\lambda}) / T_0^2 \quad (12)$$

根据式(9)求出哈尔滨太平国际机场的除冰航班离港动态曲线第一个峰值处的除冰航班总延误 W :

$$W = \frac{9T_0^2(\lambda_m - \mu)^2}{16(\lambda_m - \bar{\lambda})} \quad (13)$$

2) 离港动态为三角形函数的总延误

将首都国际机场除冰航班离港动态近似成三角形函数, 由图 6 知, 可将到除冰航班离港动态的函数假设为:

$$\lambda(t) = \begin{cases} \bar{\lambda} + \beta t & (0 \leq t \leq T_0/2) \\ \bar{\lambda} + \beta t \cdot (T_0 - t) & (T_0/2 < t \leq T_0) \end{cases} \quad (14)$$

式中: β 是和 T_0 相关的系数。

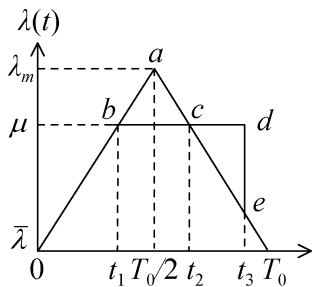


图 6 离港动态的三角形函数示意图

Fig. 6 Sketch of triangle function of departure dynamics

同理, 根据式(9)计算得出首都国际机场的除冰航班离港动态曲线第一个峰值处的除冰航班总延误 W :

$$W = \frac{T_0^2(\lambda_m - \mu)^3}{2\sqrt{2}(\lambda_m - \bar{\lambda})^2} \quad (15)$$

3.2 除冰装备需求优化模型

飞机除冰产生的除冰总延误主要取决于两个方面: 申请除冰的离港航班动态和机场除冰中心的除冰保障服务能力。为了使利益最大化, 航空公司希望尽量减少由于飞机除冰导致的航班延误, 机场为了能够增加吞吐量, 希望尽可能提高机场除冰喷嘴的服务率, 但提高喷嘴的除冰服务率会导致除冰成本的增加。因此根据除冰航班的离港动态合理安排除冰喷嘴服务率, 在航班延误成本和除冰成本最小时得出科学、合理的除冰喷嘴数量, 达到优化除冰装备参数的目的。

航班延误除冰时的总成本包含飞机除冰延误成本和除冰成本, 即

$$Z = n_d \cdot C + W \cdot K \quad (16)$$

式中: C 为除冰装备每天维护和运行成本; K 为每架次航班每小时延误产生的平均延误成本; n_d 为喷嘴数量。

根据上述研究, 不同的离港动态分布, 其延误模型也不同, 下面分别计算两类典型机场的航班延误总成本:

1) 除冰离港航班动态成抛物线模型

根据式(16)和(13)得到航班延误除冰时的总成本为:

$$Z = \frac{\mu}{\mu_1} \cdot C + \frac{9T_0^2(\lambda_m - \mu)^2}{16(\lambda_m - \bar{\lambda})} \cdot K \quad (17)$$

可见, 航班延误除冰总成本 Z 是喷嘴的服务率 μ 的函数, 根据可导函数极值定理得出 Z 最小时的最优除冰喷嘴服务率:

$$\mu^* = \lambda_m - 0.89(\lambda_m - \bar{\lambda}) \cdot \left(\frac{C/\mu_1}{T_0^2 K} \right) \quad (18)$$

由式(5)计算得出除冰喷嘴的最优数量:

$$nd^* = \frac{1}{\mu_1} \cdot \left\{ \lambda_m - 0.89(\lambda_m - \bar{\lambda}) \cdot \left(\frac{C/\mu_1}{T_0^2 K} \right)^{\frac{1}{2}} \right\} \quad (19)$$

2) 除冰离港航班动态近似成三角形模型

根据式(16)和(15)得到航班延误除冰时的总成本为:

$$Z = \frac{\mu}{\mu_1} \cdot C + \frac{T_0^2 (\lambda_m - \mu)^3}{2\sqrt{2} (\lambda_m - \bar{\lambda})^2} \cdot K \quad (20)$$

根据可导函数极值定理得出 Z 最小时的最优除冰喷嘴服务率:

$$\mu^* = \lambda_m - 0.97(\lambda_m - \bar{\lambda}) \cdot \left(\frac{C/\mu_1}{T_0^2 K} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (21)$$

同理得出最优的除冰喷嘴数量:

$$nd^* = \frac{1}{\mu_1} \cdot \left\{ \lambda_m - 0.97(\lambda_m - \bar{\lambda}) \cdot \left(\frac{C/\mu_1}{T_0^2 K} \right)^{\frac{1}{2}} \right\} \quad (22)$$

4 模型仿真

针对国内两类典型机场冬季航班离港动态, 分析并拟合出冰雪天气下离港高峰时段航班动态分布函数, 基于两种函数模型分别研究了除冰航班延误机理, 建立航班延误和除冰成本最小时装备需求数量优化模型, 该模型针对类似机场是否具有一定的通用性, 其误差精度如何, 本文利用首都国际机场和哈尔滨太平机场冬季真实离港数据实例仿真与验证。

根据前述研究, 首都国际机场的除冰航班离港密度高度集中, 其离港曲线分时段呈现三角形特点, 除冰喷嘴数量优化按照三角形模型计算。哈尔滨太平机场的除冰航班离港密度较稀疏, 分时段呈现抛物线分布特点, 其除冰喷嘴数量优化按照抛物线模型计算。

4.1 首都机场除冰喷嘴数量优化仿真

1) 仿真数据确定

以图 2 中 06:00-12:00 为仿真测试数据, 尽管后续航班流量有波动, 但航班离港数量明显小于高

峰时段, 根据前述分析, 后续时段航班延误和所需喷嘴数量不考虑。

首都机场配备了 6 个集中除冰坪, 通过实际考察 6 个除冰坪之间的距离之和等效为 2.4 km。具体计算参数如表 1 所示。每架飞机的平均除冰时间 \bar{t}_{id} 与冰雪等级和飞机机型等有关, 根据文献资料提供的除冰数据^[14-15], 各天气下其值详见表 2。

表 1 首都国际机场除冰仿真算例参数
Tab. 1 Simulation example of deicing at Capital International Airport

International Airport					
参数	数值	参数	数值	参数	数值
K	2 370 美元/天	L	2 400 m	\bar{a}	4~8 架次
C	1 000 美元/天	v	20 km/h	t_{ref}	20 min
λ_m	76 架次/h	λ	34.5 架次/h	T_0	3.5 h

表 2 不同机型和雪情时的平均除冰时间 \bar{t}_{id} (分钟)
Tab. 2 Average deicing time of different models and snow conditions \bar{t}_{id} (minute)

机型	霜/冻雾	轻度湿雪	中度湿雪	重度湿雪	冻雨
B747	18	23	30	40	60
A330	13	18	23	34	45
B757	8	11	16	20	45
A320	7	9	14	19	45

2) 仿真结果及分析

根据上述参数及公式(4)和(21)计算, 得出不同冰雪等级和机型时单个除冰喷嘴服务率 $\bar{\mu}_1$, 如表 3 所示。

表 3 首都机场单个除冰喷嘴服务率
Tab. 3 Capital Airport single ice removal nozzle service rate

机型	霜/冻雾	轻度湿雪	中度湿雪	重度湿雪	冻雨
B747	2.5	2.1	1.7	1.3	0.9
A330	3.1	2.5	2.1	1.5	1.2
B757	4.2	3.5	2.7	2.3	1.3
A320	4.6	3.9	2.9	2.4	1.3

根据式(22)进行除冰喷嘴数量优化, 并对仿真结果四舍五入, 得出首都机场在不同冰雪等级和机型时除冰喷嘴数量优化结果, 如表 4 所示。

冰雪天气航班延误时除冰航班机型号不确定, 这里以中雪情况下机场总除冰服务率作为模型评价依据。首都机场实际总除冰平均服务率为 77.6

架次/h, 通过除冰喷嘴数量优化得出的总除冰平均服务率为 71.3 架次/h, 误差约为 8.1%, 误差在容许范围内。表明针对离港航班数量密度高度集中, 航班离港分布呈现三角形状态, 采用三角形优化模型对喷嘴需求数量优化可行。

表 4 首都机场不同雪情和机型时除冰喷嘴数量优化结果
Tab. 4 Optimization results of deicing nozzle quantity at Capital Airport under different snow conditions and types

机型	霜/冻雾	轻度湿雪	中度湿雪	重度湿雪	冻雨
B747	29	34	42	53	75
A330	23	29	34	47	61
B757	17	21	26	31	59
A320	16	18	24	30	57

4.2 哈尔滨太平机场除冰喷嘴数量优化仿真

1) 仿真参数选取

分析图 2 中哈尔滨太平机场的除冰航班离港动态, 取高峰期 06:00-12:00 时段作为测试数据, 平均除冰时间 \bar{t}_{id} 按照表 2 定义, 哈尔滨机场除冰坪之间的平均近似距离 $L=1\ 000\text{ m}$, 其他仿真参数计算结果如表 5 所示。

表 5 哈尔滨太平机场除冰仿真参数
Tab. 5 Simulation parameters of Harbin Taiping Airport deicing

参数	数值	参数	数值	参数	数值
K	2 370 美元/天	L	1 000 m	\bar{a}	4~8 架次
C	1 000 美元/天	V	20 km/h	\bar{t}_{refl}	20 min
λ_m	21 架次/h	λ	7.29 架次/h	T_0	2.67 h

2) 仿真结果及分析

根据上述参数及公式(4)和(18)计算, 计算得出不同雪情和机型时单个除冰喷嘴服务率 $\bar{\mu}_i$, 如表 6 所示。

表 6 哈尔滨太平机场单个除冰喷嘴服务率
Tab. 6 Harbin Taiping Airport single ice removal nozzle service rate

机型	霜/冻雾	轻度湿雪	中度湿雪	重度湿雪	冻雨
B747	2.7	2.2	1.7	1.3	0.9
A330	3.4	2.7	2.2	1.6	1.0
B757	4.8	3.9	2.9	2.4	1.1
A320	5.2	4.4	3.2	2.6	1.2

根据除冰喷嘴数量优化抛物线模型, 根据式(19)并对仿真结果四舍五入, 得出哈尔滨太平机场在不同雪情和机型时的除冰喷嘴数量优化结果, 如表 7 所示。

表 7 哈尔滨太平机场不同雪情和机型时除冰喷嘴数量优化结果

Tab. 7 Results of icing quantity optimization at different snow conditions and models at Harbin Taiping Airport

机型	霜/冻雾	轻度湿雪	中度湿雪	重度湿雪	冻雨
B747	8	9	12	15	22
A330	6	8	9	13	18
B757	4	5	7	8	17
A320	4	5	6	8	15

哈尔滨机场实际总除冰平均服务率 22.3 架次/h, 通过除冰喷嘴数量优化结果得出的总除冰服务率为 20.7 架次/h, 误差约为 7.1%, 误差在容许范围内。表明针对除冰离港航班数量密度比较集中, 航班离港分布呈现抛物线形状, 采用近似抛物线的喷嘴数量优化模型可行。

4.3 喷嘴数量优化仿真结果对比

上述两种情况仿真可知, 除冰喷嘴数量优化结果值随着飞机机型增大而增多, 冰雪气象恶劣程度越明显时, 所需的喷嘴数也越多。由于哈尔滨太平机场的离港航班流量较小, 各种机型、雪情下的除冰喷嘴数量都小于首都机场相同情况下的喷嘴数, 这一点和实际情况相符。说明针对国际枢纽机场和区域干线机场, 分别采用基于三角形和抛物线模型优化计算机除冰喷嘴数量方法可行。另外, 仿真结果和实际运行结果存在一定误差, 其原因可能在于实际除冰坪距离、航班机型分布、除冰装备运行状况和实际除冰航班动态等因素有关。

5 结论

针对冰雪天气航班延误情况下飞机地面除冰装备配置数量优化问题, 论文提出了基于航班延误和除冰成本最小的除冰装备数量需求优化方法, 得出结论如下:

1) 以国际枢纽机场和区域干线机场冬季航班除冰延误为对象, 针对不同的除冰航班离港密度和分布特征, 分析并拟合出离港高峰时段航班动态分布函数, 研究了除冰过程的航班延误形成机理, 并建立了基于三角形和抛物线形状的除冰航班延误模型。以航班总延误和除冰成本最小为目标, 分别建立了两类典型除冰航班离港动态分布的除冰喷嘴数量优化模型。

2) 利用首都国际机场和哈尔滨太平国际机场的除冰运行实测数据, 对两种典型的除冰喷嘴数量优化模型进行了仿真验证, 通过实例仿真得出不同机型和冰雪等级情况下的除冰喷嘴需求优化数量。仿真结果和实际数据一致, 最大误差在 8.1% 以内, 表明该研究方法对类似机场飞机除冰喷嘴需求数量优化具有参考意义。

参考文献:

- [1] Eugene G Hill. Overview of Federal Aviation Administration Aviation Safety Research for Aircraft Icing[R]. AIAA Paper, 2006: 81.
- [2] Reehorst, Ghung J, Potapczuk M. Study of Icing Effects on Performance and Controllability of an Accident Aircraft[J]. Journal of Aircraft, 2000, 37(2): 2253-2259.
- [3] Norin A, Andersson T, Peter Värbr, et al. A GRASP Heuristic for Scheduling De-icing trucks at Stockholm Arlanda Airport[C]. Published in the proceedings of the 6th INO Workshop, 2007.
- [4] Lee J T, Chen S, Daskalakis A. Deicing decision support tool[C]. Digital Avionics Systems Conference. IEEE, 2004.
- [5] Mao X, Ter Mors A W, Roos N, et al. Agent-based scheduling for aircraft deicing[C]// Conference on Artificial Intelligence. Reston, VA, USA: AIAA, 2007: 229-236.
- [6] Hanaoka S, Saraswati B. Low Cost Airport Terminal Locations and Configurations[J]. Journal of Air Transport Management (S0969-6997), 2011, 17(5): 314-319.
- [7] 沈文兴. 基于排队论的机场除冰问题研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2013.
Shen Wenxing. Research on Airport Deicing Based on Queuing Theory[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013.
- [8] Zhang H B, Shi D H. Analysis of Two Queueing Models with Explicit Rate Operators and Stationary Distributions[J]. International Journal of Information and Management Sciences (S0268-4012), 2011, 12(22): 70-81.
- [9] Mayhew L, Smith D. Using Queuing Theory to Analyse the Government's 4-h Completion Time Target in Accident and Emergency Departments[J]. Health Care Management Science (S1386-9620), 2008, 11(1): 11-21.
- [10] 李兵, 逯斌飞, 苏丹, 等. 飞机除冰服务资源的并行机调度方法[J]. 信息与控制, 2012, 41(5): 644-649.
Li Bing, Lu Binfei, Su Dan, et al. A Parallel Machine Scheduling Algorithm for Aircraft De-Icing Service Resources[J]. Information and Control, 2012, 41(5): 644-649.
- [11] Xing Zhiwei, Li Yi. Research of Algorithms for Aircraft Ground Deicing Operation Scheduling Model[C]. Proceedings of the 8th World Congress on Intelligent Control and Automation, Jinan, China, 2010: 5973-5974.
- [12] 邢志伟, 王桂芳, 李轶. 飞机地面除冰运行延误分析与调度方法[J]. 信息与控制, 2010, 39(6): 743-748.
Xing Zhiwei, Wang Guifang, Li Yi. Daly Analysis and Scheduling Method for Aircraft Ground Deicing Operation[J]. Information and Control, 2010, 39(6): 743-748.
- [13] Wu Mengli, Li Luyao, Chen Bin. Optimization Research of the Aircraft Deicing Problem[J]. Advanced Materials Research (S1022-6680), 2012, 616/618(12):4.
- [14] TP Yang. Aircraft Ground Deicing Operation Process Model[J]. Journal of Civil Aviation University of China (S1674-5590), 2010, 28(3): 5-10.
- [15] 陈斌, 王立文. 飞机除冰液地面除冰过程模型仿真与实验[J]. 系统仿真学报, 2012, 24(3): 556-560.
Chen Bin, Wang Liwen. Model Simulation and Experiment of Aircraft Deicing Process Using Deicing Fluids on Ground[J]. Journal of System Simulation, 2012, 24(3): 556-560.