直升飞机自然积冰试验方案设计与实例应用

孙晶[1]　蔡淼[1*]　周毓荃[1]　欧建军[2]

（1 中国气象局云雾物理环境重点开放实验室，中国气象局人工影响天气中心，北京 100081；
2 上海辈友气象科技有限公司，上海 201306）

摘要　针对直升机自然积冰试飞，结合直升机飞行特性，分析了不同气象条件下试验飞行路线确定原则。利用模式预报和实况监测产品，设计了直升机积冰试验飞行方案，并在 2018 年 3 月新疆乌鲁木齐外场试验中进行了应用和检验。结果表明，直升机自然积冰试验飞行方案的确定原则需要充分考虑直升机的飞行特性。在层状云中进行自然积冰试飞，根据积冰区相对云区位置，考虑从云底或云顶进入积冰区的原则。建立了飞机积冰飞行方案设计流程。利用积冰潜势预报系统提前 72 h 开展概率预报，利用云降水显式预报系统提前 24 h 开展云条件预报，利用卫星雷达探空等观测资料提前 3 h 开展积冰条件监测预警。预报和监测结果显示，计划试验当天云的宏微观条件较为理想，符合飞机积冰形成的条件。针对此云层设计了采取云底进入探测区和云底退出的规避方式，在云中采用多次往返爬升和平飞寻找过冷水区以完成积冰探测。实际飞行也采用了云底入云并云中探测到了积冰和过冷水，是一次比较成功的飞机积冰航线设计和应用实例。

关键词　直升机；积冰；过冷水；飞行方案设计

中图分类号：P49　**DOI**：10.19517/j.1671-6345.20210272　**文献标识码**：A

引言

飞机积冰是指在飞行过程中，飞机机体因过冷水滴冻结或水汽凝华而聚积冰层的现象[1]。飞机积冰通常发生在含有过冷水滴的云、雾、冻雨或湿雪中，多出现在突出部位，积冰严重时会影响飞行安全。大型运输机在起飞、进近、着陆阶段，或航线穿越浓密云层或冻雨的环境中，可能发生积冰[2-4]；一些低速飞机，如运输机、直升机等，发生积冰的可能性也很大；人工增雨作业由于需要选择过冷水丰沛的云层进行播撒作业[5-8]，飞机更易发生积冰；在对新研制的飞机进行自然积冰试飞试验时，要在积冰区域飞行，进行合格审定。自然积冰试验主要是检验飞机的抗积冰能力，需要飞机搭载云粒子测量仪器在具有较好积冰条件的云层中飞行。因此，开展飞机自然积冰试验对了解积冰云层特性以及飞机型号研制、适航认证和飞行安全具有重要意义。

飞机积冰的强度与气象条件和飞机特性有关[9]。气象因素主要包括大气温度、云中过冷水含量、过冷水滴的大小。已有统计结果表明，最易发生积冰的温度范围是 $-10\sim-2$ ℃，轻度积冰易出现在 $-10\sim0$ ℃，中度积冰易出现在 $-12\sim-2$ ℃，强积冰易出现在 $-10\sim-8$ ℃[10]。

过冷水是指在负温区的液态水，云中过冷水含量越大，积冰强度也越大[11]，云滴的大小影响积冰的类型和强度，但影响程度比含水量和温度小[12]。影响积冰的飞机因素主要包括飞行速度和飞机积冰部位的曲率半径。在其他条件相同时，飞行速度越大积冰强度越大。但是，不同飞行速度下动力增温值不同，如果动力增温使机体表面温度上升到 0 ℃以上，则飞机不会积冰。直升机巡航速度一般为 $0\sim300\ \mathrm{km\cdot h^{-1}}$，其云中飞行动力增温最大值约为

国家重点研发计划项目（2018YFC1507901、2016YFA0601702）；国家自然科学基金项目（41775131）；科技成果转化项目（1801-XMB-012，1801-XMB-013）；中国气象科学研究院基本科研业务费项目（2014Y008）共同资助

作者简介：孙晶，女，1978 年生，博士，副研究员，从事云降水物理和人工影响天气的研究，Email：sunjing@cma.gov.cn

收稿日期：2021 年 6 月 10 日；定稿日期：2022 年 1 月 7 日

* 通信作者：caimiao@cma.gov.cn

1.7 ℃。机体曲率半径越大越有利于积冰。直升机是通过旋翼控制水平和垂直方向运动的特种飞行器,多在6000 m以下的低空飞行,可以垂直上下和悬停。直升机旋翼为突出部位,积冰范围相对量大,更容易积冰[13-14]。在直升机自然积冰试验飞行中,既要考虑云层积冰气象条件,也要考虑直升机飞行速度、机动性能等,来寻找合适的积冰条件。

我国人工增雨作业飞机在飞行前,都需要进行飞行方案设计。黄毅梅等[15]针对5种云微物理探测目的进行了飞机探测设计,并进行了实例应用。李念童等[16]介绍了云层垂直和水平探测几种飞行方案,垂直探测目的主要是了解云层的垂直分布以及微物理特征,水平探测主要是了解云与降水粒子水平微物理特征,以便选择合适的催化区域。刘健等[17]根据飞机观测的过冷水区位置对增雨作业的飞行方案进行了设计。王俊等[18]在充分考虑云系移动、飞机性能等基础上,提出满足无缝隙催化要求的"8"字形飞行航线设计方法。刘晴等[19]对天津的人影飞机飞行播撒方案进行了统计分析,找出方案设计问题并加以改进。宋灿等[20]开展了飞机直接观测与遥感观测的云参数对比分析,发现合理的飞行设计及探测实现非常重要,提出了云参数检验飞行探测方案设计理念。目前对飞行方案设计主要在人工影响天气飞机作业领域,针对直升机等进行自然积冰试飞方面的分析与研究相对较少。

随着我国各种类型飞机新机型的研制,自然积冰适航验证方面的需求在不断增加。近10年来国内陆续开展了多次飞机自然积冰试验。2018年3月,在国产某型直升机于新疆昌吉地区进行的自然积冰探测试验中,中国气象局人工影响天气中心对合适的积冰云层特征进行了预报监测分析,并开展了直升机积冰试验飞行路线设计和退出策略研究。本文对直升机自然积冰试验飞行方案设计方法和实例应用进行分析。

1 飞行方案设计思路

总体来说,引起飞机积冰的云层主要分为积云和层云两大类[9]。积云水平尺度一般几十公里,垂直尺度一般几公里,云的上半部含水量和水滴最大,是积冰最强区域,但云中垂直气流较强,飞机在积云中飞行比较危险,应尽量避免。如果在积云中进行自然积冰试飞,应考虑从云侧面进入积冰区的原则,若云底在0 ℃层附近或暖区很薄,可考虑从云底进入积冰区。若出现严重积冰,在积云中改变航向,从侧面出云或下降到较暖的气层。一般进行飞机自然积冰试验的云层主要为层状云。层状云水平尺度比较宽广(约几百公里),垂直尺度较小(约几公里)。相应的,层状云中积冰区一般水平范围较大,而强积冰区的厚度一般不超过1000 m。如果在层状云中进行自然积冰试飞,根据积冰区相对云区位置,考虑从云底或云顶进入积冰区的原则。若出现严重积冰时,选择上升到云顶或比-15 ℃还低的高度之上、或下降至云底脱离积冰区。

直升机飞行速度从0~300 km·h^{-1},动力增温从0~1.7 ℃,所以最高积冰温度为-1.7~0 ℃。同时,直升机可快可慢的特点使其在飞行路线上可灵活设计,在有利积冰区域范围不大时,可采取悬停和小半径转弯、直上直下等探测方式。直升机最大升限6000 m,实际飞行时一般升至3000 m,因此适合积冰探测的云层一般为以中低云为主的冬季层状云。

针对直升机自然积冰试飞制定飞行路线,既要考虑直升机飞行特性,同时要考虑积冰云层特性。设计总体思路为:首先对试飞区域的积冰云层气象条件进行预报分析,再利用临近的卫星雷达等监测资料对预报结果进行订正,最后根据云层条件结合直升机飞行特点给出飞行路线。中国气象局人工影响天气中心研发了具有云参数预报和监测能力的多套系统,包括积冰潜势预报系统FISPv1.0、云降水显式预报系统CPEFSv1.0、卫星云参数反演系统、探空云分析系统等,可以实现对试验区域的云系宏微观结构和积冰气象条件进行预判和临近预警。在试飞前72 h进行积冰潜势预报,提前24 h对云系性质、云系移向和移速、云中过冷水的分布区域及垂直范围、过冷水的量级等进行预报;提前3 h利用卫星、雷达、探空等产品分析云光学厚度、云顶温度、云顶高度、云体厚度等,监测云系覆盖情况和移动情况,对预报结果进行修正,为飞行方案制定提供依据。

2 飞行方案设计

直升机在试验中实际飞行时一般升至3000 m,并且在空域允许的条件下可以低空飞行,因此,结合云体厚度设计了云底入云和云顶入云两种方案。

2.1　云底入云方案

该方案同时适用云顶高度小于 3 km 的低云和云顶高度大于 3 km 的深厚云层。如图 1 所示,首先,起飞后以最低安全飞行高度(例如 300 m),朝着探测云带飞行到达探测区域;其次,选择目测到的浓黑结实云层作为试验云区,从云底爬升直至最大升限(若从安全考虑可采用多次往返爬升策略),可以直接得到云底高度、云顶高度和云层厚度、观测到过冷水或积冰的温度层等信息。然后,从最大升限下降至条件较好云层高度(例如观测到过冷水或积冰的温度层),在该高度平飞做盘旋飞行,云内累积飞行 30 min 后,降至云底或暖区,再爬升至过冷水层,继续平飞探测 30 min 后降至云底或暖区。达到要求后返程。

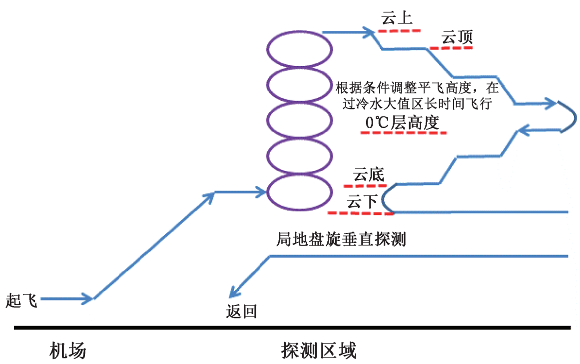

图 1　云底入云积冰探测方案设计

2.2　云顶入云方案设计

该方案适用于云顶高度小于 3 km 的低云。如图 2 所示,首先,起飞后爬升直至云顶,朝着探测云带飞行到达探测区域;其次,选择目测到的浓厚结实云层作为试验云区,从云顶下降(若从安全考虑可采用多次往返下降策略),可以直接得到云底高度、云顶高度和云层厚度、观测到过冷水或积冰的温度层。然后,从云底上升至条件较好云层高度(例如观测到过冷水或积冰的温度层),在该高度平飞做盘旋飞行,云内累积飞行 30 min 后,降至云底或升至云顶,再飞至过冷水层,继续平飞探测 30 min 后降至云底或升至云顶。达到要求后返程。

垂直盘旋探测主要目的是找到过冷水丰沛的合适温度层,这与探测点位置有很大关系。如果在垂直盘旋过程中未观测到过冷水或积冰,则还需要在 −5～−1 ℃不同温度层上垂直于云系进行长距离平飞观测过冷水。积冰试飞试验中,有时需要将结

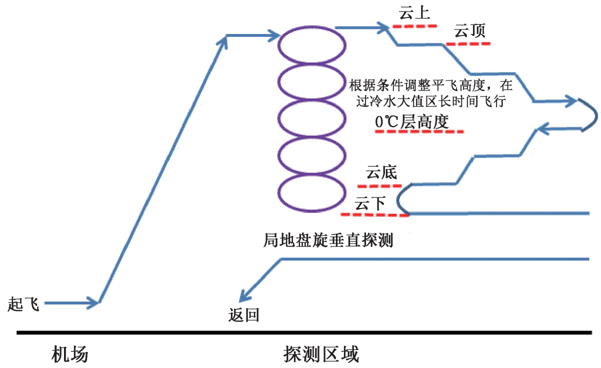

图 2　云顶入云积冰探测方案设计

上的冰层保持住。此时,需要积冰后继续该温度层来回平飞,或在有云(避免阳光直射)的负温区飞行。

遇到较强积冰时避免发生危险需要及时退出积冰云层。其方法是一要改变飞行高度,二要改变航向。实际飞行中,通常多采取改变飞行高度的方法,使在积冰云中飞行的时间减至最小。飞机在脱离积冰区选择高度层时,通常是向上脱离为好,如果向下脱离只有确切知道航线安全高度以上,有正温区或能够出云时,方能请示向下脱离[21-22]。因此,积冰后选择退出路线时,可以根据飞行高度而采取上升或下降的退出路线。

3　实例应用

2018 年 3 月,某型号直升机停靠在新疆乌鲁木齐附近某机场,开展自然积冰探测试验。试验地点的地形分布对试飞空域有很大影响。乌鲁木齐周边地形比较复杂(图 3),机场西北和东北象限海拔较低,基本在 1000 m 以下;西南和东南象限为天山山脉,海拔较高(最高点可达 4000 m);而东北象限民航飞机航路密集。同时考虑地形和直升机安全性

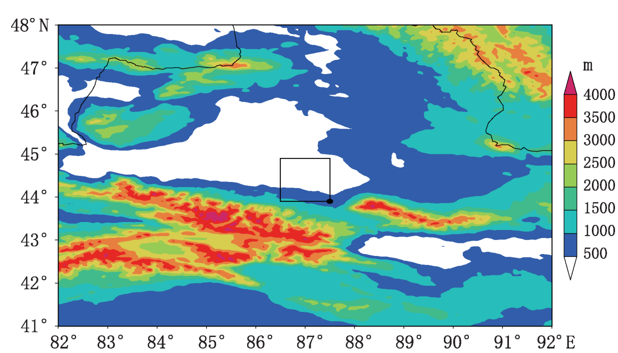

图 3　2018 年 3 月新疆直升机积冰试验飞行关注区域地形分布
(黑点代表乌鲁木齐,黑框代表试飞空域,下同)

能，重点试飞空域设为机场西北象限 100 km 范围内的昌吉地区。针对这一试飞空域，利用中国气象局人工影响天气中心相关产品开展了积冰云层预报监测分析。

3.1　积冰潜势预报

美国近 20 年来发展了积冰潜势（CIP）算法[23-25]，该算法利用多个物理量的模糊逻辑相关关系而综合判断得到积冰潜势。其稳定云层初始积冰潜势计算方法为：

$$I_{ini} = T_{map}C_{map}R_{map} \times 100\% \tag{1}$$

其中，T_{map} 为温度相关关系，C_{map} 为云顶温度相关关系，R_{map} 为相对湿度相关关系。

孙晶等参考这一算法，结合直升机飞行特点，构建了直升机积冰潜势计算方法[26]，并曾利用 NCEP 再分析资料对 2016 年安庆积冰个例和 2018 年两次直升机个例进行了积冰潜势计算，结果显示 3 次积冰个例的积冰潜势结果均在 80%以上。

利用直升机积冰潜势计算方法，采用 NCEP 全球模式 0.5°×0.5°的温度和湿度场预报结果形成积冰潜势预报系统 FISPv1.0。在 2018 年 3 月 24 日开展了针对 27 日前后的试验区域的积冰潜势预报。27 日新疆地区主要受东移短波槽系统影响，试验区域周边水汽条件较好，中低空存在相对湿度大值区，北疆地区有小雪（或雨夹雪）量级的降水。人影中心积冰潜势预报系统的结果发现（图 4），27 日试验区域空中积冰概率较高，部分区域积冰潜势超过 90%，从不同高度的积冰潜势看，主要的积冰潜势大值区集中在 2～6 km 范围，适合直升机试验飞行的高度要求。

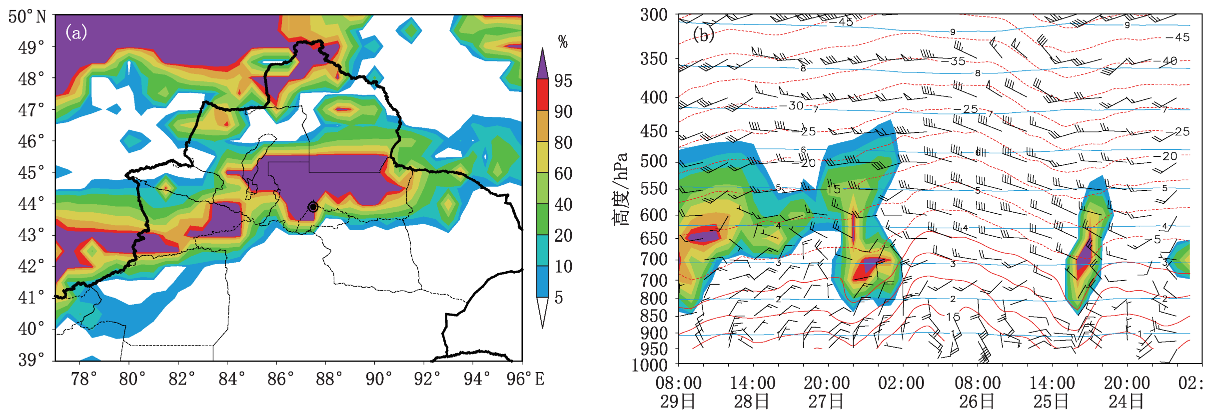

图 4　2018 年 3 月 27 日 08:00 最大积冰潜势预报水平分布(a)，2018 年 3 月 24 日 02:00 至 29 日 08:00 乌鲁木齐的单站积冰概率预报时序图(b)

（图 a 中黑色圆圈：乌鲁木齐；图 b 中，红线：温度（单位：℃），蓝线：高度（单位：km），风向标：水平风场）

3.2　积冰云条件预报

中国气象局人工影响天气中心云降水显式预报系统（CPEFSv1.0）是以 WRF 中尺度模式动力框架为基础耦合了中国气象科学研究院 CAMS 微物理方案。初始场为 3 h 一次 0.25°×0.25°的 GRAPES 全球模式格点资料，模式最高水平分辨率为 3 km，预报时效 48 h，1 h 输出一次。预报产品包括云宏微观场和降水场，每日向全国业务发布，对层状云积冰天气、对流云降水等均有较好预报效果[27-28]。

利用 3 月 26 日 08:00 起报的 CPEFSv1.0 预报产品对 27 日积冰云条件进行分析（图 5）。27 日白天，乌鲁木齐周边 300 km 范围内，有云系自西向东移动并逐渐南压，云系移速 30～50 km·h^{-1}，乌鲁木齐西北方向的试飞区域将受其影响，云系以层状冷云为主，云底高度约 2 km，云顶高度大于 6 km。在云系中下层含有一定的过冷水，含量大值区主要在 0.01～0.3 g·kg^{-1}的量级范围，过冷水层主要位于 2～4 km 范围内，高度范围与预报的积冰潜势大值区的分布范围较为一致。因此，建议 27 日 08:00—14:00 在乌鲁木齐西北方向 100 km 范围内的试验区内开展积冰探测。

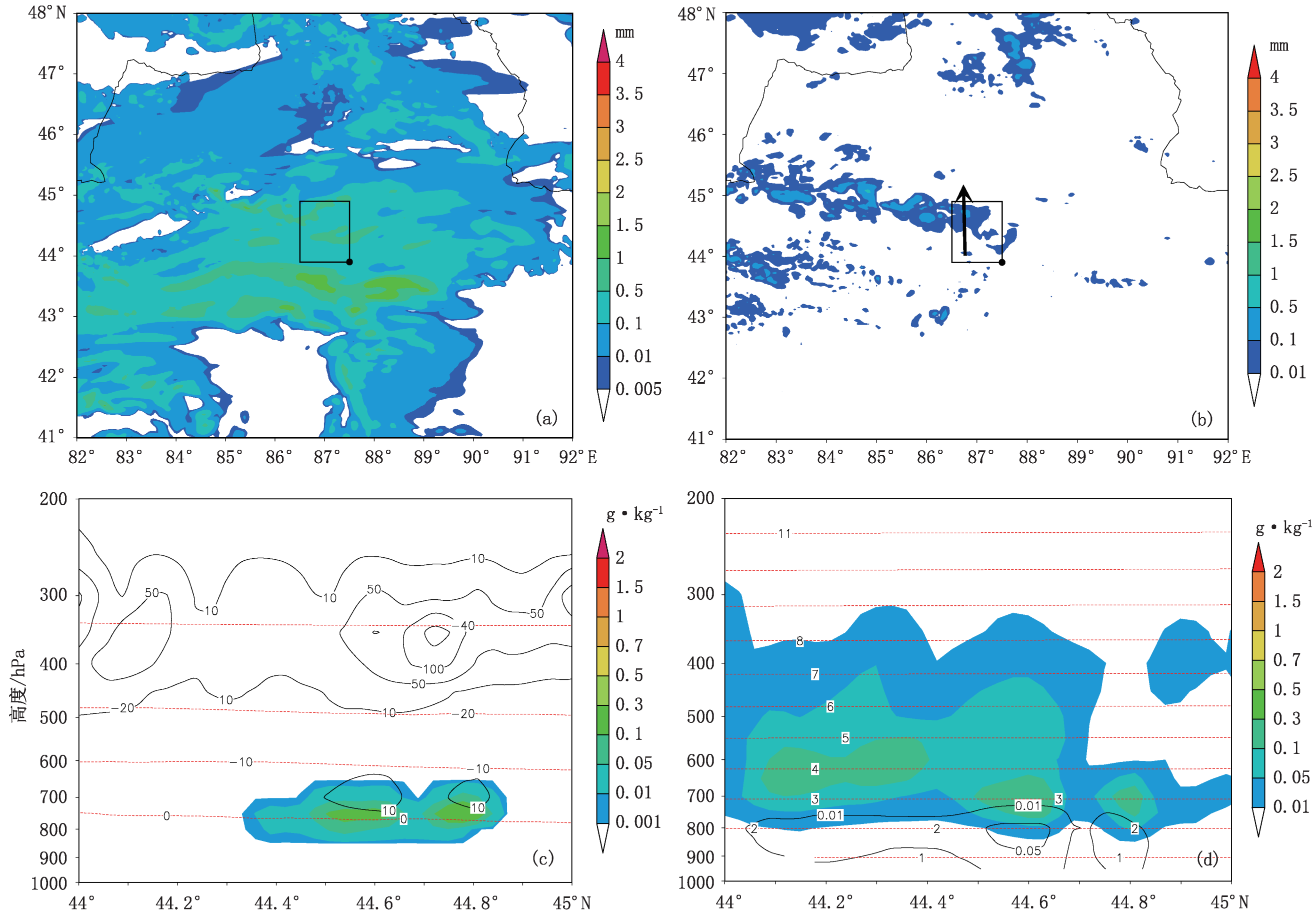

图 5　2018 年 3 月 27 日 11:00 水平和垂直分布预报云场:(a)垂直累积总水凝物云带,(b)垂直累积过冷水,(c)沿图 b 黑色箭头的云水混合比(阴影)、冰晶数浓度(等值线,单位:个・L^{-1})、温度(红线,单位:℃),(d)沿图 b 黑色箭头的雨水混合比(黑线,单位:g・kg^{-1})、雪和霰混合比之和(阴影)、高度(红线,单位:m)

3.3　积冰云条件监测

中国气象局人工影响天气中心的云特征参量静止卫星反演系统是基于 FY-2 静止卫星资料融合探空和地面观测等综合观测资料开发而成[29],包括云顶温度、云顶高度、云光学厚度、云粒子有效半径等宏微观产品。其中云光学厚度是指云系在整个路径上云消光的总和,为无量纲参数,可用于了解云系垂直方向厚实程度。

3 月 27 日早上,利用卫星反演产品、雷达、探空等观测资料进行积冰云条件的监测预警分析。从 03:00—08:00 的卫星云参数产品可以看出,高空浅槽云系呈东西走向分布,位于北疆大部地区,北部云顶温度−40 ℃以下,南部云顶温度−20～−10 ℃,自西向东移动,云顶移速约 70～80 km・h^{-1};08:00—10:00(图 6),试飞区域位于高空浅槽云系的南部云带中,云顶温度在−20～−10 ℃,云顶高度 3～5 km 左右;光学厚度的云图上反映出云中液水丰沛且分布不均匀,光学厚度大值区对应高空浅槽云系南部云顶高度 3～5 km 区域,试飞区域光学厚度在 24～36,位于云带南部光学厚度大值区内。从新疆石河子 C 波段天气雷达探测结果来看(图 7),试飞区域内有降水回波,回波比较均匀,强度在 5～15 dBz,回波缓慢东移,从垂直结构来看,回波顶约在 5 km,回波向下有所增长,说明地面有降水形成。

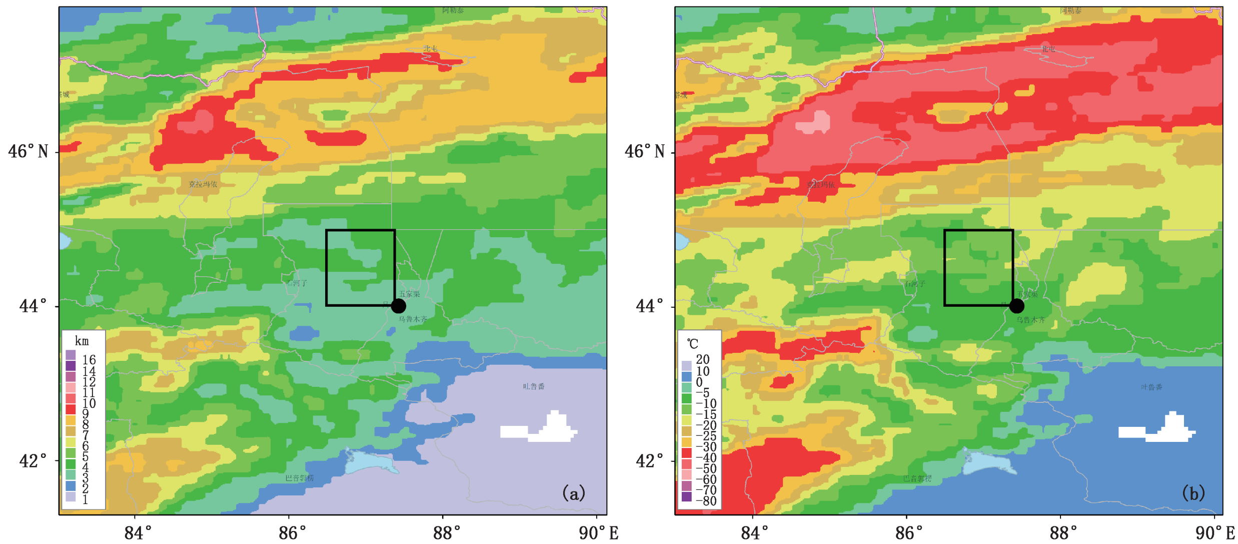

图 6 2018 年 3 月 27 日 09:30 FY-2G 卫星反演云顶高度(a)和云顶温度(b)分布

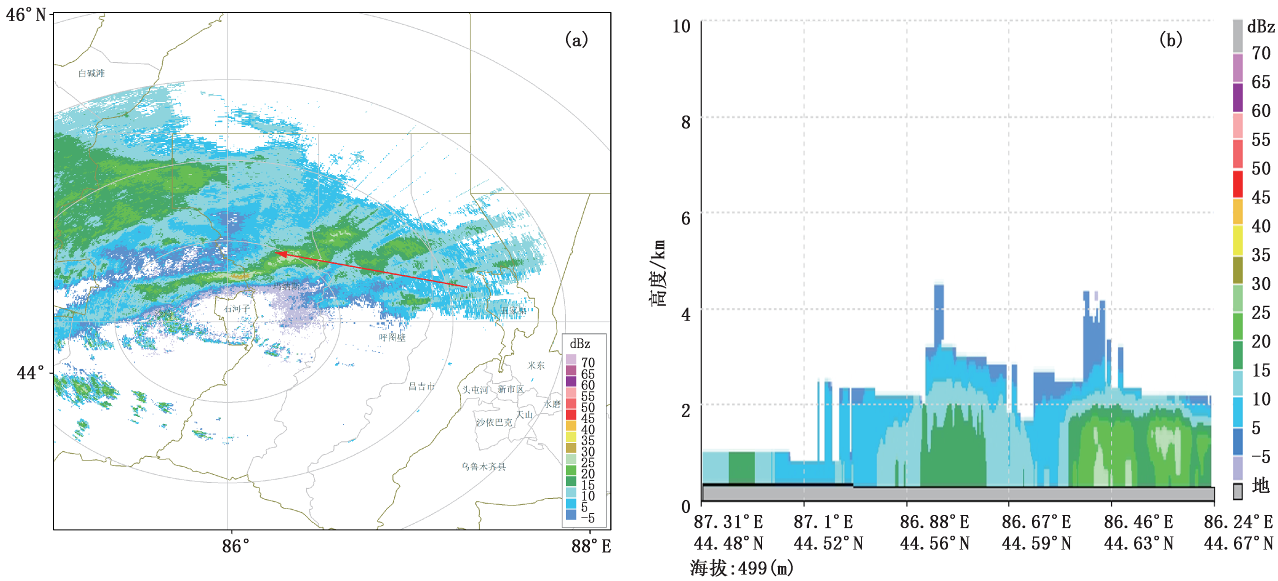

图 7 2018 年 3 月 27 日 10:11 石河子雷达监测回波水平分布(a)和沿图 a 中红色箭头的回波垂直分布(b)

利用乌鲁木齐单站探空分析云系垂直结构,本文将 80% 相对湿度大值区近似看作云区。27 日 08:00(图 8a),乌鲁木齐 2~3 km 有相对湿度大值区,云层较薄厚度约 1 km,0 ℃ 高度为 2000 m,3000 m 高度有锋面逆温,云层恰分布于逆温层下;此次高空槽云系东西向分布且范围宽广(图 6a),因此乌鲁木齐探空站 08:00 的结果可以近似代表昌吉地区 11:00 左右的云层状况。利用 L 波段探空秒数据的温湿度数据,对积冰潜势进行了计算(图 8b),乌鲁木齐探空 08:00 低云云顶高度约 2617 m;0 ℃层高度约 2000 m,2000~3000 m 之间积冰潜势大于 90%。

从云宏观结构分析来看,积冰云层为中低云云层,云顶有逆温,云顶高度约为 4 km,云顶温度 -20~-10 ℃,云底高度 1.5 km,云层厚度 1~3 km,光学厚度大于 24,雷达回波强度在 15 dBz 以下。因此,在上午时段试飞区域具有较好的积冰条件。

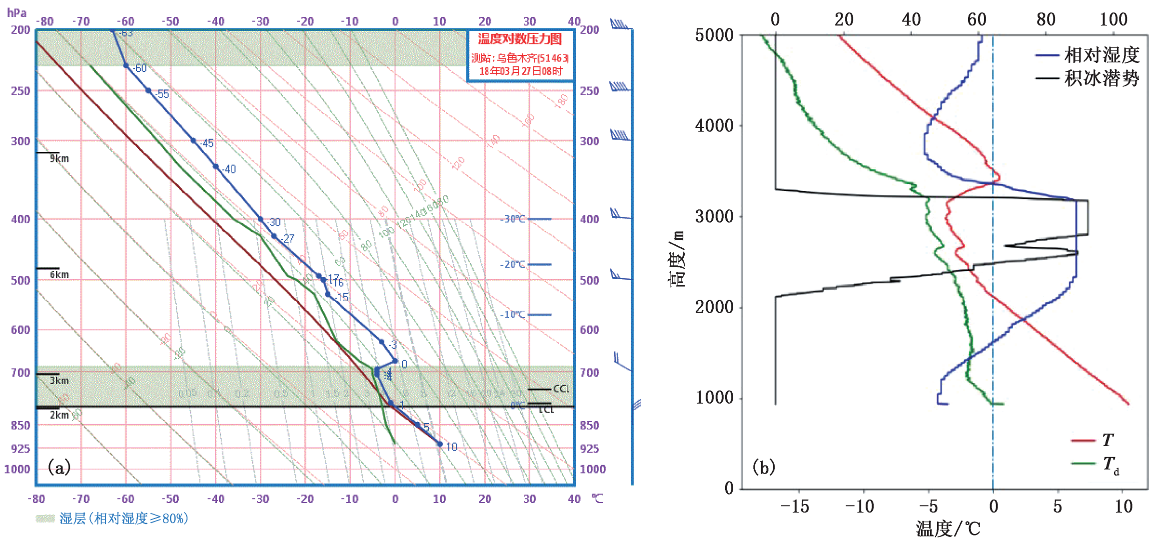

图 8　2018 年 3 月 27 日 08:00 乌鲁木齐 T-ln$p$ 图(a)和基于探空计算的积冰潜势(b)
(图 b 中,红线:温度(单位:℃),绿线:露点(单位:℃),蓝线:相对湿度(单位:%),黑线:积冰潜势(单位:%))

3.4　积冰试飞方案设计

根据积冰云层预报监测结果,试飞区域内将在 11:00—13:00 出现积冰概率较大的积冰云层,云顶高度约 3～5 km,云底高度约 1.5 km,因此适宜采取云底进入探测区和云底退出的规避方式进行探测试验。

27 日 10:00 给出具体飞行方案,具体为:起飞后以最低飞行高度 300 m 朝着机场西北方向100 km 附近的探测云带飞行,选择目测到的浓黑结实云层作为试验云区,从云底爬升直至最大升限(若安全考虑可采用多次往返爬升策略),可以直接得到云底高度、云顶高度和云层厚度、各温度层、观测到过冷水或积冰的温度层。从最大升限下降至 2～3 km 之间条件较好的云层高度(观测到过冷水或积冰的温度层),在该高度平飞做盘旋飞行,云内累积飞行 30 min 后,降至云底或暖区,再爬升至过冷水层,继续平飞探测 30 min 后降至云底或暖区。达到试飞要求后返程。注:①飞机退避时采取降至云底的退避方案。②条件较好云层高度由飞行员根据当时积冰、过冷水和温度,结合试验需求和安全确定。③若在垂直爬升过程中未观测到过冷水或积冰,则在−5 ℃层垂直或平行于云系进行长距离平飞观测过冷水,看时间决定进行积冰试验或者返程。④飞行过程中,30 s 更换飞行状态,确保飞行作动器运作。

3.5　实际飞行情况

2018 年 3 月 27 日,直升机在(86.77° E,44.45° N)为中心的 2 km 范围试飞区域内,于 11:00—11:45 期间在云中完成了自然积冰试飞。如图 9,试飞期间,飞机由云底入云,云下有降水,飞行探测高度 2000～2200 m(海拔高度),飞机速度 120～160 km•h^{-1},机上仪器实测温度−1～0 ℃(不考虑动力增温影响),云中液态水含量 0.3～0.6 g•m^{-3}。积冰表面光滑、通体透明,属于明冰。积冰厚度在 1～2 cm,属于轻到中度积冰。可以看出,积冰云层的预报监测结果得到了飞机积冰探测实况的印证,飞行方案设计合理,在飞机积冰探测中发挥了重要作用。

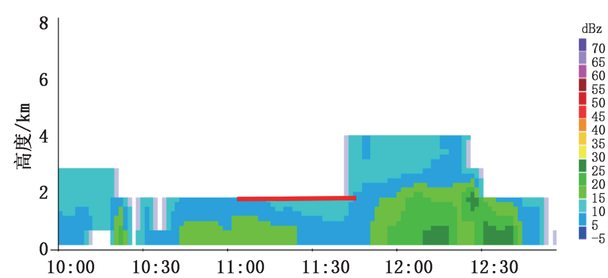

图 9　2018 年 3 月 27 日 10:00—13:00 在(86.77°E,44.45°N)位置的实测雷达回波高度-时间剖面图,红线代表飞机积冰探测高度和时段

4 结论

2018年3月某型国产直升机在我国新疆昌吉地区进行了自然积冰试验，中国气象局人工影响天气中心利用预报和监测系统对积冰气象条件进行了跟踪分析。针对直升机自然积冰试飞，结合直升机飞行特性，分析了不同气象条件下试验飞行路线确定原则。利用模式预报和实况监测的云结构条件，设计了直升机积冰试验飞行方案，并在2018年3月新疆乌鲁木齐外场试验中进行了应用和检验。

(1)直升机自然积冰试验飞行方案的确定原则应结合积冰云层气象条件、云宏微观特性，充分考虑直升机特性。在层状云中进行自然积冰试飞，根据积冰区相对云区位置，考虑从云底或云顶进入积冰区的原则。若出现严重积冰时，选择上升到云顶或比−15 ℃还低的高度之上、或下降至云底脱离积冰区。

(2)建立了飞机积冰飞行方案设计流程。利用积冰潜势预报系统提前72 h开展潜势预报，利用云降水显式预报系统提前24 h开展云条件预报，利用卫星雷达探空等观测资料提前3 h开展积冰条件监测预警。预报和监测结果显示，计划试验当天云的宏微观条件较为理想，符合飞机积冰形成的条件。

(3)针对此云层设计了采取云底进入探测区和云底退出的规避方式，在云中采用多次往返爬升和平飞寻找过冷水区以完成积冰探测。实际飞行也采用了云底入云并云中探测到了积冰和过冷水，是一次比较成功的航线设计和应用实例。

参考文献

[1] 赵树海. 航空气象学[M]. 北京:气象出版社，1994.

[2] 刘烈霜,金山,刘开宇. 用AMDAR资料分析两次强飞机积冰过程[J]. 气象科技，2013,41(4):764-770.

[3] 王钦,吴俊杰. 四川盆地低空飞行飞机积冰的气象条件分析[J]. 气象科技,2018,46(4):799-808.

[4] 杨洁,王兵,刘峰. 一次冷锋过程的云微物理特征分析以及飞机积冰预报检验[J]. 气象科技,2020,48(1):81-96.

[5] 唐林,李琼,黎祖贤,等. 一次积层混合云云系微物理结构数值模拟与增雨条件分析[J]. 干旱气象,2020,38(1) : 100-108.

[6] 孙鸿娉,李培仁,闫世明,等. 山西省2008—2010年64架次飞机云物理观测结果分析[J]. 气象科技,2014,42(4):682-689.

[7] 孙玉稳,董晓波,李宝东,等. 太行山东麓一次低槽冷锋降水云系云物理结构和作业条件的飞机观测研究[J]. 高原气象,2019,38(5): 971-982.

[8] 李冬楠,刘星光,高倩楠,等. 一次东北冷涡过程的宏微观物理特征分析[J]. 气象科技,2020,49(2):227-234.

[9] 王秀春,顾莹,李程. 航空气象[M]. 北京:清华大学出版社，2014.

[10] 李子良. 飞机积冰预报应用软件[J]. 气象,1996,22(12):17-19.

[11] 王洪芳,刘健文,纪飞,等. 飞机积冰业务预报技术研究[J]. 气象科技,2003,31(3):140-145.

[12] 庞朝云,张逸轩. 甘肃中部地区飞机积冰的气象条件分析[J]. 干旱气象,2008,26(3):53-56.

[13] 钟国,曹义华,赵明. 直升机旋翼积冰的数值模拟[J]. 北京航空航天大学学报,2012,38(3):330-339.

[14] 曹普孙,张威,胡偶. 基于CCAR_29附录C的旋翼积冰特性研究[J]. 直升机技术，2019(3):1-4.

[15] 黄毅梅,濮江平,邵振平,等. 河南省人工增雨飞机云微物理探测设计[J]. 气象科技,2014,42(5):893-896.

[16] 李念童,李铁林,郑宏伟. 河南省飞机人工增雨试验方案设计[J]. 应用气象学报,2001,12(增刊):200-205.

[17] 刘健,于勇,蒋彤. 吉林省层状云中过冷水含量_SLWC_分布及最佳飞行方案设计[J]. 吉林气象，2004(3):9-11.

[18] 王俊,王庆,龚佃利. 飞机增雨作业"8"字型航线设计探讨[J]. 干旱气象，2018,36(1)：136-140.

[19] 刘晴,王兆宇. 天津及周边区域飞机增雨飞行方案改进研究[J]. 天津科技,2019,46(1) :70-76.

[20] 宋灿,周毓荃,赵洪升. 卫星云参数与飞机云物理探测对比研究和飞行方案设计[J]. 气象与环境科学，2019，42(2) : 10-18.

[21] 周莉,徐浩军,龚胜科,等. 飞机积冰特性及防除冰技术研究[J]. 中国安全科学学报,2010,20(6):105-110.

[22] 高宏. 积冰的判断预防和处置[J]. 科技资讯，2013,16:224-225.

[23] Bernstein B C，McDonough F，Politovich M K，et al. Current icing potential algorithm description and comparison with aircraft observations [J]. J Appl Meteor，2005,44：969-986.

[24] Bernstein B C，Wolff C A，McDonough F. An inferred climatology of icing conditions aloft，including supercooled large drops. Part I：Canada and the Continental United States [J]. J Appl Meteor Climatol，2007，46(11):1857-1878.

[25] Bernstein B C，Le Bot C. An inferred climatology of icing conditions aloft，including supercooled large drops. Part II：Europe，Asia，and the Globe [J]. J Appl Meteor Climatol，2009，48，(8):1503-1526.

[26] 孙晶,谭超,周毓荃,等. 新疆春季两次直升机积冰气象条件分析[J]. 气象与环境科学,2021,44(4):24-32.

[27] 孙晶,蔡淼,王飞,等. 安庆地区一次飞机积冰的气象条件分析[J]. 气象,2019,45(10):1341-1351.

[28] 史月琴,刘卫国,王飞,等. 一次对流云人工消减雨作业云条件预报和作业预案合理性分析[J]. 气象,2021,47(2):192-204.

[29] 周毓荃,陈英英,李娟,等. 用FY2C/D卫星等综合观测资料反演云物理特性产品及检验[J]. 气象,2018,34(12):27-35.

Design and Application of Helicopter Natural Icing Test

SUN Jing[1] CAI Miao[1] ZHOU Yuquan[1] OU Jianjun[2]

(1 Key Laboratory for Cloud Physics of China Meteorological Administration, CMA Weather Modification Centre, Beijing 100081; 2 Shanghai Weather Technology Co., Ltd, Shanghai 201306)

Abstract: Aiming at the natural icing flight test of a helicopter, combined with the helicopter's flight characteristics, the determining principle of the test flight route under different meteorological conditions is analyzed. The CMA Weather Modification Centre designed the helicopter icing test flight scheme based on the cloud structure conditions of the model forecast and real-time monitoring, applied, and verified it in the field test in Urumqi, Xinjiang, in March 2018. The results show that the determination principle of the natural helicopter icing test flight scheme mainly considers the meteorological conditions of cloud icing, cloud macro and micro characteristics, helicopter characteristics, etc. According to the position of the icing area relative to the cloud area, the principle of entering the icing area from the cloud bottom or cloud top is considered. The design process of the aircraft icing flight scheme is established. The ice potential prediction system is used to carry out probability prediction 72 hours in advance. The cloud precipitation explicit prediction system is used to carry out cloud condition prediction 24 hours in advance. The satellite inversion products carry out ice accretion condition monitoring and early warning 3 hours in advance. The forecast and monitoring results show that the macro and micro conditions of clouds in the planned test are ideal, in line with the conditions for the formation of aircraft icing. In view of this cloud, we design a way to avoid the cloud bottom entering into the detection area and exiting from the cloud bottom. To complete the ice detection, we use multiple climbing and flying to find the supercooled water area in the cloud. In the actual flight, ice accretion and supercooled water are also detected in the cloud, which is an ideal design and application example of aircraft icing.

Keywords: helicopter; aircraft icing; supercooled water; flight scheme design