

严酷结冰气象条件下临界冰形的确定方法

赵铁英*

中国航空工业集团有限公司民机产业部适航处, 北京 100028

摘 要: 严酷结冰气象条件是指 FAR25 部第 140 号修正案 (Amdt.25-140) 给出的结冰气象条件, 美国联邦航空局 (FAA)、欧洲航空安全局 (EASA) 和中国民用航空局 (CAAC) 均建议并计划对航空器实施该类结冰气象条件下的适航性要求。本文重点介绍了该修正案中提出的结冰气象条件中各相关气象参数的要求和规定, 并对部分参数进行了初步研究。同时还探讨了在严酷结冰气象条件下飞机机翼前缘临界冰形的确定方法。

关键词: 结冰气象条件; 临界冰形; 过冷大水滴

中图分类号: V212.1 文献标识码: A DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2018.08.048

飞机在结冰气象条件下飞行时, 在飞机的迎风表面会形成冰积聚, 即飞机发生结冰。飞机的表面结冰会破坏飞机的气动外形, 降低飞机的升阻比, 威胁飞机的飞行安全。

以往 (FAR25 部第 140 修正案 (Amdt.25-140 修正案颁布之前) 开展民用航空器结冰研究时采用的结冰气象条件通常是中国民用航空规章第 25 部 R4 版中附录 C 规定的“连续最大结冰”和“间断最大结冰”结冰条件, 涉及到的最大平均水滴直径在 $50\ \mu\text{m}$ 以下。Amdt.25-140 修正案对民用飞机结冰的气象条件提出了更加严酷的条件^[1], 要求将在飞机表面形成结冰的云层中的液态水滴直径尺寸最大增大到 $1000\ \mu\text{m}$, 并计划在未来的 25 部适航规章中增加 25.1420 条和附录 O (主要是过冷大水滴) 等相应的适航性要求。这些适航性要求对从事飞机结冰研究的技术人员而言是新的要求, 也是较为严峻的考验。因此, 应尽早开展相关的研究, 掌握满足相关适航性要求的设计和符合性验证方法, 促进国内民用航空器防除适航性设计和验证技术的快速发展。

1 常规结冰气象条件

在美国联邦航空局 (FAA) 正式颁布 Amdt.25-140《飞机和发动机合格审定要求: 过冷大水滴、混合相、冰晶结冰气象条件》修正案之前, 关于运输类飞机结冰气象条件的规定, 依据的均是 FAR25 部的附录 C 第 I 部分“大气结冰条

件”。在该附录中对需要进行结冰影响符合性验证的飞机, 影响其结冰速率、结冰量及结冰形状的气象条件主要是指云层液态水含量、云层水滴平均有效直径和周围空气温度三类气象条件变量^[2]。

1.1 连续最大结冰

大气结冰状态的连续最大强度 (连续最大结冰) 由云层 (主要为层云结构) 液态水含量、云层水滴平均有效直径和周围空气温度三个变量决定。在该结冰气象条件适用范围是: 气压高度从海平面到 6700m 高度处; 最大云层垂直厚度为 1980m; 云层覆盖的水平标准距离为 32.22km (大于该距离可用系数进行修正)。具体到前面提到的三个变量, 其取值范围为液态水含量为 $0.0\sim 0.8\text{g}/\text{m}^3$; 平均有效水滴直径为 $15\sim 40\ \mu\text{m}$; 结冰温度范围为 $-30\sim 0^\circ\text{C}$ 。

1.2 间断最大结冰

大气结冰状态的间断最大强度 (间断最大结冰) 由云层 (主要为积云结构) 液态水含量、云层水滴平均有效直径和周围空气温度三个变量决定。在该结冰气象条件适用范围是: 气压高度 1200~6700m; 由于积云的结构特点, 最大间断强度结冰条件未规定最大云层垂直厚度; 云层覆盖的水平标准距离为 4.82km (大于该距离可用系数进行修正)。具体到前面提到的三个变量, 其取值范围为液态水含量为 $0\sim 3.0\text{g}/\text{m}^3$; 平均有效水滴直径为 $15\sim 50\ \mu\text{m}$; 结冰温度范围为 $-40^\circ\text{F} (-40^\circ\text{C})\sim 26^\circ\text{F} (-3.33^\circ\text{C})$ 。

收稿日期: 2018-07-19; 退修日期: 2018-07-28; 录用日期: 2018-08-01

* 通信作者. Tel.: 010-58356899 E-mail: zhaoty@avic.com

引用格式: Zhao Tieying. Determination of critical ice shape under inclement ice weather conditions [J]. Aeronautical Science & Technology, 2018, 29 (08): 48-52. 赵铁英. 严酷结冰气象条件下临界冰形的确定方法 [J]. 航空科学技术, 2018, 29 (08): 48-52.

1.3 最大起飞结冰

起飞时最严重的结冰条件(最大起飞结冰)为云中水含量 0.35 g/m^3 , 平均水滴直径 $20 \mu\text{m}$, 地面环境温度 -9°C 。最大起飞条件从地面延伸到起飞表面上 457m 的高度。

1.4 各种参数对结冰情况的影响

上述结冰气象条件影响的主要是结冰速率, 对结冰量和结冰形状进行研究时还需要增加结冰时间、迎角和飞行速度等参数^[3]。上述参数对飞机结冰冰形的影响及关系如下: (1) 当云层的液态水含量与时间的乘积为常数时, 结冰的冰形和厚度不变; (2) 当水滴直径、液态水含量、环境温度和迎角固定时, 结冰的冰形随时间的延长而增厚; (3) 当上述参数固定, 而速度和时间的乘积为常数时, 结冰厚度不变, 但形状不同; (4) 当水滴直径、液态水含量、环境温度和迎角固定, 而改变迎角时, 会得到完全不同的冰形, 机翼翼型驻点也会发生明显的改变。

2 严酷结冰气象条件

在 FAA 的 Amdt.25-140 修正案颁布之前, 最严酷的结冰气象条件为 FAR25 部附录 C 中规定的“间断最大结冰”, 其最大的液态水含量可达到 3.0 g/m^3 , 最大水滴直径可大 $50 \mu\text{m}$ 。但这样的气象条件已经无法完全涵盖已知的结冰气象条件的范围。在 Amdt.25-140 修正案中给出的附录 O 中对目前为止最严酷的结冰气象条件进行了规定, 最严酷的结冰气象条件即过冷大水滴结冰条件包括发生于层云中或层云下的冻毛毛雨和冻雨, 其最大的水滴直径的极限可达 $1000 \mu\text{m}$ 以上。

2.1 冻毛毛雨结冰气象条件

冻毛毛雨结冰气象条件的最大水滴直径处于 $100\sim 500 \mu\text{m}$ 范围内; 压力高度范围为 $0\sim 7600\text{m}$ (基于平均海平面的高度); 云层的最大垂直范围为 3660m ; 水平范围为 32.22km ; 液态水含量最大为 0.44g/m^3 ; 环境温度范围为 $-25\sim 0^\circ\text{C}$, 如图 1~ 图 3 所示。

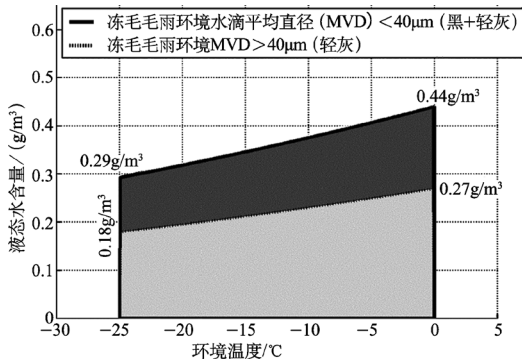


图 1 冻毛毛雨液态水含量

Fig.1 Liquid water content in frozen hairy rain

2.2 冻雨结冰气象条件

冻雨结冰气象条件的最大水滴直径处于大于 $500 \mu\text{m}$; 压力高度范围为 $0\sim 3660\text{m}$ (基于平均海平面的高度); 云层的最大垂直范围为 2130m ; 水平范围仍为 32.22km ; 液态水含量最大为 0.31g/m^3 , 环境温度范围为 $-13\sim 0^\circ\text{C}$, 如图 4~ 图 6 所示。

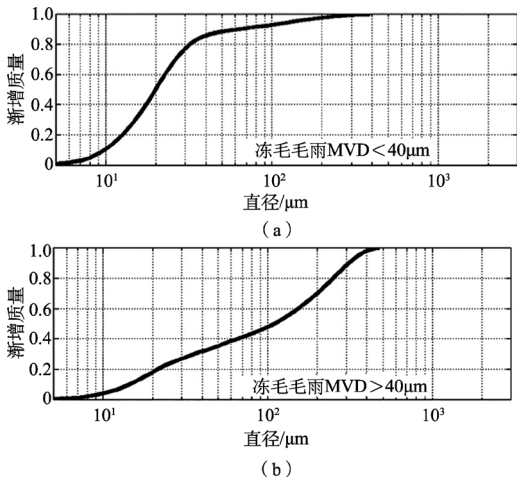


图 2 冻毛毛雨的水滴直径分布

Fig.2 Droplet diameter distribution in frozen hairy rain

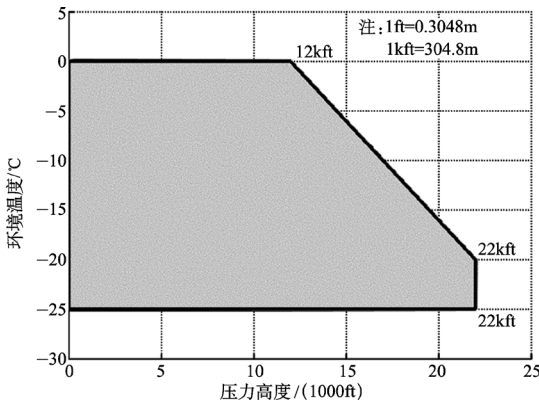


图 3 冻毛毛雨的温度和高度

Fig.3 The temperature and height of the frozen hairy rain

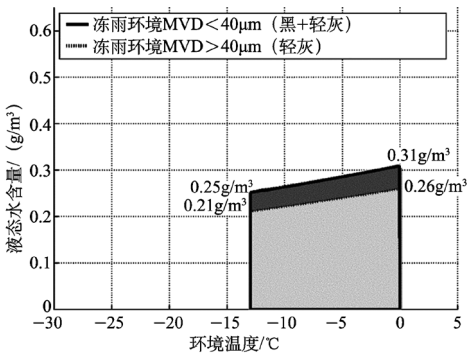


图 4 冻雨的液态水含量

Fig.4 The content of liquid water in freezing rain

2.3 水平范围的确定

对于水平范围非标准距离 32.22km 的冻毛毛雨和冻雨的液态水含量,用下列方法确定:用图 1 或图 4 的液态水含量值乘以图 7 的系数。系数用下列方程确定:

$$S = 1.266 - 0.213 \log_{10} (H/1.852)$$

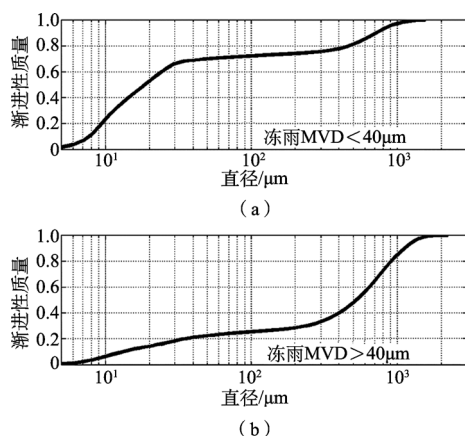


图 5 冻雨的水滴直径分布

Fig.5 Distribution of water droplets in freezing rain

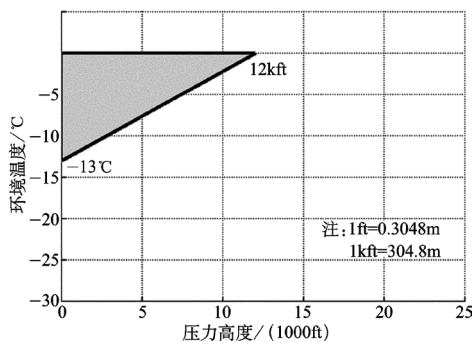


图 6 冻雨的温度和高度

Fig.6 The temperature and height of the freezing rain

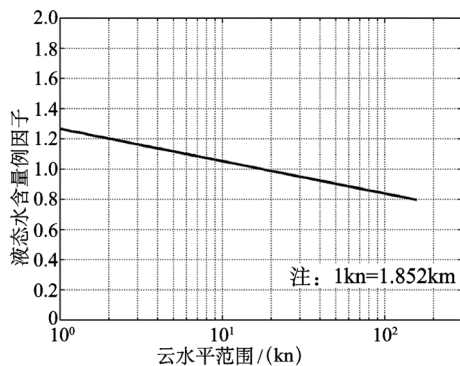


图 7 冻毛毛雨和冻雨的水平范围

Fig.7 The horizontal range of frozen hairy rain and freezing rain

式中: S 为液体水含量比例因子(无量纲); H 为水平范围,单位为 kn。

3 严酷结冰气象条件下临界冰形的确定

对适航审定结冰情况的飞机,如果其最大起飞总重量低于 60000lb (1lb=0.454kg) 或有直接力反馈飞行操纵系统,则需按严酷气象条件进行结冰符合性验证,其他情况则可仍按 25 部附录 C 的结冰气象条件验证结冰条件下的条款符合性。开展结冰对飞机的每个飞行阶段的性能和操纵品质的影响的分析和评估,需采用最临界的冰积聚情况,即采用临界冰形来表明飞机在 B 分部相应条款在结冰条件下的符合性。

3.1 起飞形态下的临界冰形的确定

按 25.1420 (a) (2) 或 (3) 审定的飞机需考虑起飞形态下的临界冰形,起飞形态下的结冰分为两个阶段,一是起飞结冰,另一个为起飞最后阶段结冰,具体的确定要求如下:

(1) 起飞结冰

起飞结冰发生在从起飞距离末端(即飞机速度达到安全起飞速度,飞机距离起飞表面 10.7m 高度那一点)到高于起飞表面 122m 之间的飞行阶段,并假定起飞结冰为按附录 O part I 规定的结冰条件下始于起飞末端的冰积聚。必须假定在飞机达到高于起飞表面 122m 前不会采取行动启动防冰系统^[4]。

(2) 起飞最后阶段结冰

起飞最后阶段结冰为从高于在起飞表面 122m 到高于起飞表面 457m 或完成从起飞构型到航路构型转变的高度或飞机达到最终起飞速度 V_{FTO} 时的高度,这三个高度中取大者。假定冰积聚开始于起飞距离末端,结冰条件按附录 O part I 的定义。必须假定在飞机达到高于起飞表面 122m 前不会采取行动启动防冰系统。

3.2 航路形态下的临界冰形的确定

按最新的适航性要求,航路形态下的临界冰形可按两种情况确定:

(1) 按 25.1420 (a) (1) 审定的飞机,该类飞机有能力探测到正处于附录 O part I 的结冰气象条件下飞行时,应立即撤离该结冰气象条件,只要在撤离过程中飞机能安全飞行。在确定该航路冰形时的结冰气象条件可选择附录 C 的连续最大结冰气象条件。

(2) 按 25.1420 (a) (2) 审定的飞机,该类飞机有能力探测到飞行环境的结冰气象条件超出了附录 O part I 中规定的那类结冰气象条件时,应立即撤离该结冰气象条件,只要在撤离过程中飞机能安全飞行。在确定该航路冰形时的结冰气象条件可选择附录 O part I 中给定的结冰气象条件。

上述两种情况下确定的结冰只是航路结冰的一部分,还应加上在附录 O part II (b) (5) 中定义的探测前结冰,以及飞机在两种云团之间过渡的冰积聚。

3.3 待机形态下的临界冰形的确定

按最新的适航性要求,待机形态下的临界冰形可按两种情况确定:

(1) 按 25.1420 (a) (1) 审定的飞机,该类飞机有能力探测到正处于附录 O part I 的结冰气象条件下飞行时,应立即撤离该结冰气象条件,只要在撤离过程中飞机能安全飞行^[5]。在撤离过程中的冰积聚的结冰气象条件可选择附录 C 的连续最大结冰气象条件即可。

(2) 按 25.1420 (a) (2) 审定的飞机,该类飞机有能力探测到飞行环境的结冰气象条件超出了附录 O part I 中规定的那类结冰气象条件时,应立即撤离该结冰气象条件,在撤离过程中只要求飞机能安全飞行。相应的撤离过程中的结冰气象条件可选择附录 C 的连续最大结冰气象条件。若探测的结果是飞行环境的结冰气象条件未超出附录 O part I 规定的结冰气象条件,则飞机需在该结冰条件下飞行相应的时间,以保证可以结出足够的冰。在确定该待机过程冰形的结冰气象条件时可选择附录 O part I 中给定的结冰气象条件。

在附录 O part II (b) (2) 中规定“待机结冰要求的总暴露时间不需要超过 45min”;在附录 O part II (c) (4) 中规定“待机飞行阶段为,按附录 O part I 定义的结冰条件,在一个水平范围 32.22km 的云团内飞行 45min”。关于飞机未防护表面结冰验证时间的问题,国外适航权威机构的观点是两种:一是未防护表面的最大结冰厚度不超过 76.2mm,二是结冰气象条件下飞行 45min。目前 FAA、欧洲航空安全局(EASA) 和中国民用航空局(CAAC) 等适航当局均倾向于前者,即以飞机的未防护表面最大结冰厚度达到 76.2mm 为标准,达到则认为满足试验要求,结束试验。这种观点对于严酷结冰气象条件尤为适用,因为这样的结冰气象条件下飞机未防护表面在很短的时间内就会结出满足要求的结冰厚度,因此无需再等待 45min。

上述两种情况下确定的结冰只是待机结冰的主要部分,还应加上在附录 O part II (b) (5) 中定义的探测前结冰,以及飞机在两种云团之间过渡的冰积聚。

3.4 进场形态下的临界冰形的确定

按相应的适航性要求,进场形态下的临界冰形的确定应按附录 O part II 的 (b) (2) 段定义,或按附录 O part II 的 (b) (3) (I) 或 (II) 段要求确定的最严酷/最临界的待机结冰情况。

(1) 对接 FAR25.1420 (a) (1) 审定的飞机,以巡航构型,从附录 C 的 part I 定义的连续最大结冰条件的最大垂直结冰范围高度 (1981m) 开始,下滑至高于着陆表面 610m

高度的冰积聚,加上转换为进场构型的冰积聚;再加上按附录 O part II 的 (b) (5) 段定义的探测前结冰以及飞机在两种云团(云团为着陆表面之上 610m 高处,水平范围 32.22km) 之间过渡的冰积聚。

(2) 对接 FAR25.1420 (a) (2) 审定的飞机,以巡航构型,从附录 O part I 定义的最大垂直结冰范围高度(冻毛毛雨的起始高度为 3658m,冻雨的起始高度为 2134m) 开始,下滑至高于着陆表面 610m 高度的冰积聚,加上转换为进场构型的冰积聚。同时该类飞机还需再增加在着陆表面之上 610m 高度,按附录 O part I 定义的结冰气象条件下,水平飞行 15min 的冰积聚;再加上附录 O part II 的 (b) (5) 段定义的探测前结冰以及飞机在两种云团(云团处于着陆表面之上 610m 处,水平范围 32.22km;一云团为附录 O part I 规定的最临界结冰条件。另一云团为附录 C 的连续最大结冰情况) 之间过渡的冰积聚。

3.5 着陆形态下的临界冰形的确定

按相应的适航性要求,着陆形态下的临界冰形的确定应按附录 O part II 的 (b) (2) 段定义,或按附录 O part II 的 (b) (4) (I) 或 (II) 段要求确定的最严酷/最临界的待机结冰情况。

(1) 对接 FAR25.1420 (a) (1) 审定的飞机,以巡航构型,在附录 C 的连续最大结冰情况下,从附录 C 定义的最大垂直结冰范围 (1981m),下滑到高于着陆表面 6100m 的冰积聚,加在 610m 高度由巡航构型过渡到进场构型和以进场构型在着陆表面以上 610m 高度飞行 15min 的冰积聚,再加从着陆表面以上 610m 下降到着陆表面以上 61m 高度处(含从进场构型过渡到着陆构型)的冰积聚;再加上附录 O part II 的 (b) (5) 段定义的探测前结冰以及飞机在两种云团(云团处于着陆表面之上 61m 处,水平范围 32.22km;一云团为附录 O part I 规定的最临界结冰条件。另一云团为附录 C 的连续最大结冰情况) 之间过渡的冰积聚。

(2) 对接 FAR25.1420 (a) (2) 审定的飞机,在附录 O part II 的 (c) (5) (I) 定义的待机冰积聚条件下,加上按附录 O part I 定义的结冰条件下从高于着陆表面 610m 下滑到高于着陆表面 61m,再加上在 61m 处转换为着陆构型过程的冰积聚,以及随后按 FAR25.119 的最小爬升梯度的要求复飞,从高于着陆表面 61m 直到高于着陆表面 610m,并在该高度以进场构型飞行 15min,然后以着陆构型下滑到着陆表面(接地)为止,上述过程中的总的冰积聚;再加上附录 O part II 的 (b) (5) 段定义的探测前结冰以及飞机在两种云团(云团处于着陆表面之上 61m 处,水平范围 32.22km;一云

团为附录 O part I 规定的最临界结冰条件。另一云团为附录 C 的连续最大结冰情况) 之间过渡的冰积聚。

3.6 探测前的冰积聚冰形形态的确定

探测前结冰是按附录 C part I 或附录 O part I 规定的结冰气象条件下, 在探测结冰气象条件飞行情况 (要求按 FAR25.1420 (a) (1) 和 (2) 退出) 之前的冰积聚。它是以前就存在的冰积聚, 它可开始于结冰条件 (批准飞机飞行) 飞行, 在进入结冰条件之后和要求退出之前, 加冰情探测期间的冰积聚, 再增加 2min 时间间隔的冰积聚 (用于机组考虑采取措施, 退出结冰情况, 包括与空管的协调等消耗的时间)。对按 FAR25.1420 (a) (1) 审定的飞机, 对以前冰积聚的考虑必须基于附录 C 的结冰条件。对按 FAR25.1420 (a) (2) 审定的飞机, 对以前冰积聚的考虑必须基于附录 C 的更严酷结冰条件, 或按附录 O part I 规定的结冰条件, 但其前提是飞机能安全运行。

4 结束语

严酷结冰气象条件的定义是基于 FAA 发布的 Amdt.25-140 中给出的即将补充到 FAR25 部中的附录 O “过冷大水滴结冰条件” part I 中规定的两类“严酷”结冰气象条件, 该类结冰气象条件较之前的结冰气象条件最显著的变化是“水滴直径”范围增加近 20 余倍。在对“严酷”结冰气象条件进行详细介绍的基础上, 对起飞、航路、待机、进场和着陆等飞行阶段的最临界结冰冰形的确定要求进行了详细的说明。可为飞机

结冰适航审定试验提供参考。

AST

参考文献

- [1] FAA-2010-0636 Airplane and engine certification requirements in supercooled large Drop (SLD), mixed phase, and ice crystal icing conditions[S]. FAA, 2014.
- [2] 常士楠. 大型飞机的防冰问题 [C]// 中国航空学会 2007 年学术年会论文集, 2007.
Chang Shinan. Ice prevention problems of large aircraft[C]// The 2007 Academic Annual Meeting of the China Aeronautical Society, 2007. (in Chinese)
- [3] 李周复. 风洞特种试验技术 [M]. 北京: 航空工业出版社, 2010.
Li Zhoufu. Special test technology for wind tunnel[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2010. (in Chinese)
- [4] Torsten N, Tim S. Electro-thermal ice protection for leading edges on large aircraft[C]//Aerospace Science Meeting & Exhibit, 1996.
- [5] Burick R A, Ryan R J. FAA certification of the lockheed martin C-130J transport ice protection system[R]. A99-36876, 1999.

作者简介

赵铁英 (1977-) 女, 硕士, 高级工程师。主要研究方向: 适航管理及技术研究。

Tel: 010-58356899 E-mail: zhaoty@avic.com

Determination of Critical Ice Shape under Inclement Ice Weather Conditions

Zhao Tieying*

Airworthiness Office, Civil Aircraft Department, AVIC, Beijing 100028, China

Abstract: Inclement ice weather conditions refer to the ice weather conditions is given by Amdt.25-140. FAA, EASA and CAAC both suggest and plan to implement the airworthiness requirements for the application of this kind of ice weather conditions to the aircraft. This paper focused on the requirements and regulations of various meteorological parameters in the ice weather conditions proposed in the amendment, and a preliminary study of some parameters was carried out. The method for determining the critical ice shape of the leading edge of aircraft wing under inclement ice weather conditions was also discussed.

Key Words: ice weather condition; critical ice shape; supercooled large drops

Received: 2018-07-19; Revised: 2018-07-28; Accepted: 2018-08-01

*Corresponding author. Tel.: 010-58356899 E-mail: zhaoty@avic.com