

某机巡航构型下结冰后的翼面流场特点与风险管控

费景荣* 才志超 丁祥

(海军航空大学航空基础学院, 烟台 264001)

摘要: 为确定某涡桨飞机巡航构型下结冰后的风险管控对策,从翼面流场特点入手,分析了有关风险,提出了具体对策。结果表明:受螺旋桨滑流及翼型的影响,该机两侧机翼积冰与气流分离不对称,是一个不容忽视的重要特点,进而导致右翼升力减小及右副翼效率下降,飞机持续右滚、下俯,高度急剧下降;而有关资料未考虑此特点,对结冰后的现象及处置描述不够完善,容易引起飞行员错误处置,风险很高。对策包括:高度重视在结冰区飞行时的风险管控;必须在结冰区飞行时,根据飞行高度、重量,按照相关原则选择速度,正确使用调整片,必要时做适当的机动;一旦飞机异常右滚,驾驶杆意外右偏,应先减小攻角、改平坡度,再拉杆退出俯冲;力戒本能地在大攻角下压杆,带着坡度拉杆等错误动作;避免大的侧滑角和平尾负攻角。应通过进一步研究、论证,完善技术资料中有关表述。

关键词: 某涡桨飞机;巡航构型下结冰;翼面流场特点;风险管控

中图分类号: V211.4

文献标识码: A

OSID:



0 引言

尽管某涡桨飞机的各类平台都装有较为完善的防冰、除冰系统,但在结冰条件下长时间飞行时,机翼除冰系统融冰产生的水容易在除冰区后部再次冻结,累积形成冰脊,有关事故证明了这一结论^[1]。在 $-10\sim-4\text{ }^{\circ}\text{C}$,过冷水滴较大、冻结慢,难以在机翼前缘积冰,也可能向后溢流、积冰^[2]。机翼后部积冰处于除冰系统作用范围之外,更为危险。此外,在恶劣天气下,可能很快出现积冰。如某涡桨飞机下降入云,数秒后能见度降低,并伴随强烈颠簸和降水、积冰、冰雹,导致一发停车,后经空地人员共同努力,安全着陆。

涡桨飞机巡航构型下结冰后,由于翼面的负压区容易导致“舵面过补偿”^[3-4],特别是由于螺旋桨滑流及翼型特点的影响,两侧机翼的积冰与气流分离不对称,飞机容易呈现自动滚转及下俯的动态特

点^[1,5]。而目前有关教材对上述问题缺乏分析,某机技术资料中有关防除冰系统作用的论述及结冰区飞行速度的选择、对异常动态处置的叙述不够完善^[6],一旦飞机积冰后大攻角滚转时飞行员就容易做出“压杆制止滚转、带着坡度拉杆制止机头下俯”等错误的本能反应,进而导致“滚转及下俯失控”的危险现象。因此,本文从某机巡航构型下结冰后的翼面流场特点入手,就有关问题进行初步分析。

1 某涡桨飞机巡航构型下结冰后的翼面流场主要特点

某涡桨飞机采用了大展弦比层流机翼、前缘拉力桨、双开缝后退式襟翼、低置平尾的布局形式,一、二类平台的舵面还采用了移轴补偿措施,结冰后各翼面流场的共性特点是翼剖面被破坏,气流分离加剧。巡航构型积冰后,三个翼面后缘的负压导致操纵效率下降,甚至铰链力矩异常,即“舵面过补

* 通信作者. E-mail: fjr_hi@163.com

引用格式: 费景荣,才志超,丁祥. 某机巡航构型下结冰后的翼面流场特点与风险管控[J]. 民用飞机设计与研究,2023(3): 37-42. FEI J R, CAI Z C, DING X. Characteristics and risk management of the wing flow field after icing in a cruise configuration of a certain aircraft[J]. Civil Aircraft Design and Research, 2023(3): 37-42 (in Chinese).

偿”。特别是机翼流场还存在不对称性,产生限制影响,具体包括两方面:

第一,右侧机翼的积冰与气流分离更严重。由于螺旋桨滑流使机翼流场的气流加速,并发生偏斜^[6],故螺旋桨后的气流速度相对较大,不易形成冰脊。左转螺旋桨的滑流向左偏斜、侧移,因而右侧机翼所受影响较小,积冰与气流分离的程度更严重。

第二,同侧机翼的外翼更易积冰与气流分离。为保证接近临界攻角之前,不会发生剧烈地倾斜,某机的机翼具有气动扭转,翼根、0.676 翼展、翼尖处的相对厚度分别为 18%、16%、14%,因而通常气流分离首先从翼根开始。但由于外翼较薄,较易积冰^[7-8],因此,外翼后部更易积冰与气流分离。

总之,受螺旋桨滑流、翼型的影响,某机在积冰区长时间飞行时,右机翼外侧的积冰与气流分离更明显,对横侧平衡的不利影响大。

2 某涡桨飞机巡航构型下积冰后翼面流场的风险

某机巡航构型下积冰后,翼面流场的风险主要表现为:持续右滚、下俯,高度急降;副翼效率下降,横侧操纵异常,极易失控。

2.1 机翼流场不对称易导致飞机自动右滚

由上述可知,某机巡航构型下积冰后,机翼流场不对称使得右翼外侧的积冰与气流分离更严重,升力减小,使飞机右滚;而右侧机翼气流分离严重、负压较高,导致右副翼非指令上偏,也会使飞机右滚。某机曾发生积冰事故,飞参记录表明,在飞参开始记录后的 9 149~9 157 s 内,副翼偏角基本不变,出现非指令性缓慢右滚,右坡度达 5.24°。这表明,机翼流场不对称性的影响已处于临界状态。在 9 157 s,第 9 次出现积冰信号后,攻角达 8.5°,右副翼表面的负压进一步增强,致使右副翼非指令上偏,由于该机采用有回力操纵系统,舵面气动力使驾驶盘右偏;到 9 162 s,右坡度达 22.3°。此后,驾驶员几次左压盘制滚,但由于右侧机翼的积冰与气流分离程度更严重,右副翼难以下偏,加之飞机的横侧转动惯量大,压杆制止滚转困难,右坡度持续增大^[1]。可见,由于某机右侧机翼的积冰与气流分离程度更严重,右副翼难以下偏,因而向左压杆制滚的效果差。

2.2 “副翼过补偿”导致横侧操纵异常

低速飞机通常采用移轴补偿,以减小杆舵操纵力。某机的一、二类平台的副翼采用了移轴补偿,如图 1(a)所示,即将副翼枢轴位置从前缘向后移动一段距离,正常情况下就可以利用位于枢轴前面的部分舵面起补偿作用,但由于 Y_1 大于 Y_2 ,此时仍需施加一定的压杆力。

如果机翼出现积冰,如图 1(b)所示,较大攻角下,机翼上表面出现明显的气流分离,如果此时向右压杆,受机翼后缘较高负压的影响, Y_1 的枢轴力矩小于 Y_2 的枢轴力矩,使副翼偏角继续上偏增大,需要的压杆力减小,即出现“副翼过补偿”使得横侧操纵异常。比如,当飞机在小速度时压杆,驾驶杆上的力可能意外减小甚至减为零,从而使坡度急剧反复变化。此时,应适当推杆减小迎角,并加油门增速^[3]。

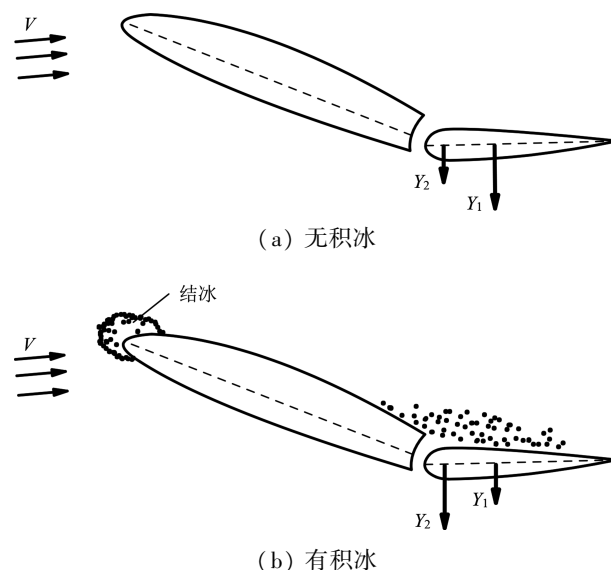


图 1 机翼积冰后的“副翼过补偿”

2.3 掉高度、“升降舵过补偿”导致飞机下俯

飞机掉高度过程中,在俯仰稳定力矩作用下,必然会机头下俯。上述事故机在飞行员制滚无效、右坡度与俯角持续增大的情况下,高速俯冲坠地,最终导致事故发生^[1]。

此外,平尾积冰后,如果放下襟翼,平尾负攻角较大时,飞行员推杆后也易出现“升降舵过补偿”。此时,如果飞行员没有及时增加拉杆力,机头会急剧下俯,造成危险情况。

国内外的有关事故证明,尽管由于尾翼等布局

的差异,不同涡桨飞机巡航构型下积冰后的具体动态不完全相同,但滚转与下俯的动态特点由翼面流场特点决定,具有一定共性^[5],是飞行员判断、处置的重要依据。根据翼面积冰后的风险评估计算,遭遇非对称结冰后,以坡度作为评估参数的风险概率为0.050 5,依照GJB900-1900标准,达到了B水平,即“很可能”,表明坡度超限引发事故的概率很大^[9]。鉴于某机横侧转动惯量大,副翼效率低,如果飞行员没有经过模拟训练又无思想准备,若还存在认知盲区、误区,一旦滚转发散失控,就更加危险,必须采取有效对策加以应对。

3 某涡桨飞机在积冰条件下飞行的风险管控对策

风险管控是一项复杂的系统工程,涉及人、机、环、管诸多方面,以及预防、处置等多个环节。

3.1 加强防范,切实避免中度、重度积冰

在积冰区较长时间飞行时,避免重度积冰是安全飞行的基础。

第一,提高认知水平,增强防范意识。该机技术资料中“为保证飞机在各种复杂气象条件下飞行,机上装有防冰”的表述,未能体现出其局限性;加之涡桨飞机的飞行高度、速度范围决定了其积冰概率较高,且轻度积冰对安全的影响不明显,易引起部分飞行员的麻痹。飞行员要正确认识上述表述的条件性,增强风险管控的自觉性。

第二,综合考虑积冰、气流分离等因素,选择速度与攻角。在积冰区选择飞行速度与攻角,既要考虑预防积冰,也要考虑其他方面的安全问题^[7]。根据驻点处动力增温的计算值,不同温度、飞行速度下机翼积冰的影响区域如图2所示^[8,10]。

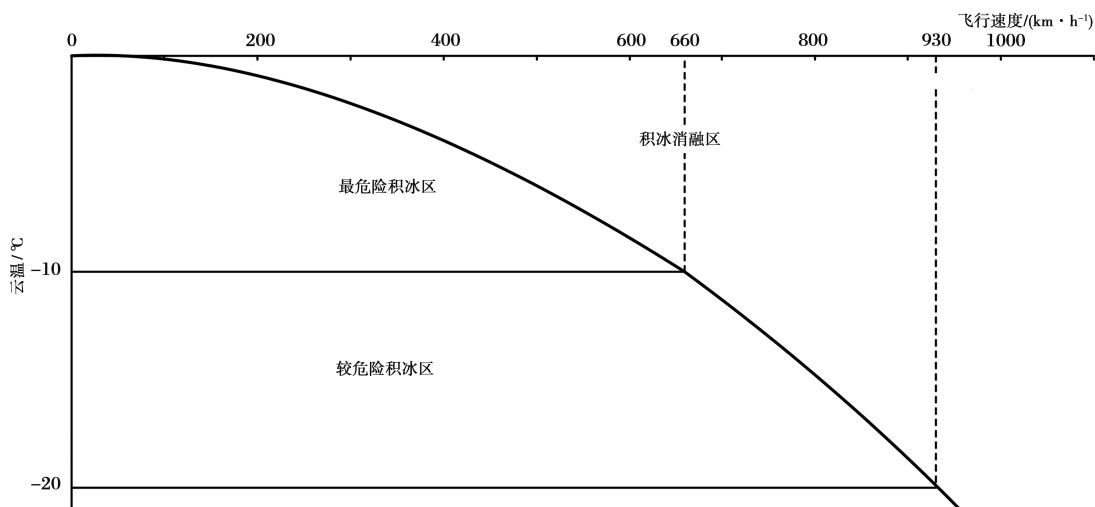


图2 不同温度及速度下的积冰影响区域

其中,最危险积冰区在云温为 $-10\sim 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的云体内,过冷水滴大,且动力增温未能使机体表面温度升高到 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上,因而最易积冰。另外,速度越大,单位时间内落在机翼上的水滴数量越多,而此区间速度与空气动力增温影响相对较小,因而积冰越强。较危险积冰区在云温为 $-20\sim 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的云体内,大小过冷水滴并存,动力增温未能使机体表面温度升到 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上,易积毛冰,且速度越大,积冰越强。积冰消融区为速度较大,动力增温能使机体表面温度升到 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上时,积冰开始消融的区域。

在危险区左边界内一定范围,由于速度小、攻角大,机翼驻点后移,容易在机翼下表面后部积

冰^[11-13],既处于除冰系统作用范围之外,也不易目视发现,这不仅对积冰后气流分离的影响大,而且处于第二速度范围,所需功率大,飞行性能差,螺旋桨滑流影响大,机翼流场的不对称性强。因此,在积冰区的最小速度应大于经济速度 $20\sim 30\text{ km/h}$ 。最小速度与最大速度(由飞行重量和高度决定)决定了巡航构型下的可选飞行速度范围,如图3所示。在危险区右边界两侧的一定范围,积冰强度最大,可定义为“回避区”。其中,由于图3是以驻点处的动力增温为依据,而实际上机翼积冰多在后部,动力增温效果较差,因而“回避区”的外边界速度较大。

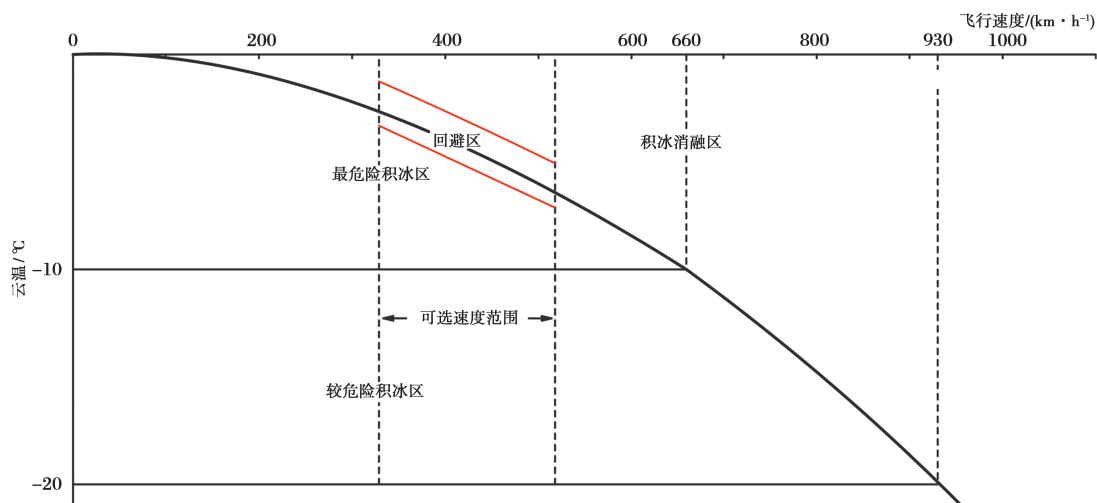


图 3 巡航构型下的可选速度范围

如果必须在积冰区飞行,应根据飞机重量、高度所对应的最大飞行速度特点,按照“远离‘回避区’”的原则,确定飞行速度与攻角。以某机 $H \leq 5.3 \text{ km}$ 为例,气温在 $0 \sim -4^\circ\text{C}$ 时,由于 $V_{\text{最大}}$ 较“回避区”的最大速度大得较多,可以最大速度在积冰消融区短时间平飞,也可以大于经济速度 $20 \sim 30 \text{ km/h}$ 脱离;气温在 $-4 \sim -20^\circ\text{C}$ 时,由于 $V_{\text{最大}}$ 接近“回避区”的最大速度,只能以大于经济速度的某一速度脱离危险区。

某涡桨飞机规定,在积冰条件下,飞行速度不得小于 400 km/h 。上述分析表明这一规定有待细化完善。

由于攻角一定,速度大小随积冰程度、飞机重量、机动量等因素而变,因而参考特征攻角保持状态更为简单、精准,是飞机操纵理念进步的体现。某机的经济攻角为 11° ,在积冰条件下直线飞行、上升,攻角以不超过 $6^\circ \sim 8^\circ$ 为宜。

这说明,由于飞行安全边界随冰形的改变而发生变化,且不同飞行参数之间相互影响,加之目前积冰探测和辨识技术精度较低,精确划分边界线可能带来风险,按照一定的模糊区划分,是现阶段一种可行的工程实用途径^[14]。

3.2 正确使用舵面调整片

某机的三个舵面后缘都装有调整片,以减轻杆舵操纵力。该机积冰后,由于各舵面处于负压区甚至出现“过补偿”,大攻角下向左压杆力增加,大的平尾负攻角拉杆力增加,大侧滑角下脚蹬向原方向移动、脚蹬力减小,而重度积冰后飞机的动态特点

是右滚、下俯,因此,副翼、升降舵调整片可正常使用,方向舵调整片则应中立。

3.3 进行适当地机动

在积冰区上升时,温度降低,一定高度范围内积冰强度增大,发动机功率较大、流场的不对称性较强,风险较大;大重量时更为明显。而下降则相反,在积冰区右转弯,右坡度容易过大,进而引起大坡度盘旋下降,风险较大;左转弯则相反,在积冰条件下,应通过适当地机动快速通过积冰危险区。

3.4 正确应对积冰后飞机状态的异常变化

一旦出现非操纵右滚、驾驶盘异常右偏等现象,应立即柔和推杆减小攻角至 5° 以下。因为积冰后右滚过程中,右翼的实际攻角比指示值大。这也是事故机在右滚、俯冲过程中,尽管指示攻角小于 10° 仍难以制止滚转的重要原因。值得注意的是,推杆减小攻角,是避免状态恶化的关键,但推杆也不宜粗猛。因为飞机滚转过程中,随着高度下降,机头会自动下俯、攻角也随之减小,况且平尾积冰后下表面也容易出现气流分离与负压区,使升降舵自动下偏,引起机头急剧下俯。

减小攻角后,应视情采取不同措施制滚,这是避免飞机急剧下俯与掉高度的前提,是保证安全的重要环节。

在变态初期开始右滚的瞬间,可及时向左压杆制滚。需注意的是,由于副翼效率低、飞机的横侧转动惯量大,压杆需要用力且保持一定时间,不可反复。

一旦开始右滚,特别是快速右滚,因右翼攻角额外增大,副翼效率进一步降低,不可压杆制滚。根据实际情况,有两种替代方法:

一是适量蹬左脚蹬,产生右侧滑与向左的横侧稳定力矩。这种方法的缺点是,制滚力矩较少,且侧滑角过大,易产生“方向舵过补偿”。

二是适量收左翼外侧发动机油门。其制滚力矩包括:右侧滑产生向左的横侧稳定力矩,左翼外侧螺旋桨滑流减弱、升力减小所产生的左滚力矩,螺旋桨向右的反作用力矩减小。此方法制滚力矩多,效果明显,建议采用。需注意的是,收油门过程中用脚蹬控制侧滑角不超过 12° 。

最后,待改平坡度后,再拉杆退出俯冲,这是保证安全的最后一环。否则,带着坡度,特别是带着大坡度拉杆,飞机容易进入急盘旋下降。

4 结论

1) 某涡桨飞机在积冰区(特别是 $-4\sim-10^\circ\text{C}$)长时间飞行时,由于冰融水或过冷水滴向后溢流,机翼后部可能结冰,处于除冰系统作用范围之外。而机翼积冰后流场不对称的特点导致飞机持续右滚及下俯,高度急降,且有关规定不够完善,风险很高。

2) 必须在积冰区飞行时,根据飞行条件,按照“远离‘回避区’”的原则,选择速度与攻角,进行必要、适当地机动,正确使用调整片。

3) 一旦出现非操纵右滚、驾驶盘右偏等异常现象,应先减小攻角,再视情采用压杆、蹬舵、收油门等方法改平坡度,最后拉杆退出俯冲。力戒本能地带着坡度拉杆、大攻角下压杆等错误动作,同时避免大的侧滑角和平尾负攻角。

建议通过进一步理论研究、试验、论证,完善技术资料中关于速度与攻角的选择、意外变态后的处置、调整片的使用等内容。

参考文献:

- [1] 胡朝江,陈列,杨全法. 飞机飞参系统及应用[M]. 北京:国防工业出版社,2012:196-200.
- [2] 兰克福德. 飞机结冰[M]. 黎先平等,译. 上海:上海交通大学出版社,2020.
- [3] 李元文,王玉琴. 运七飞机失速特性[M]. 北京:航空工业出版社,1996.
- [4] 费景荣,孙岩. 涡桨飞机积冰与“舵面过补偿”[J]. 航空杂志,2009(2):46.
- [5] 孔维梁,钱锟. 涡桨飞机结冰失速问题研究[J]. 国际航空,2009(4):53.
- [6] 李征初,王勋年,陈洪,等. 螺旋桨滑流对飞机机翼流场影响的试验研究[J]. 流体力学试验与测量,2000(2):44-48.
- [7] 李哲,徐浩军,薛源,等. 结冰对飞机飞行安全的影响机理与防护研究[J]. 飞行力学,2016,34(4):10-14.
- [8] 黄仪方. 航空气象:第2版[M]. 成都:西南交通大学出版社,2011:157.
- [9] 徐浩军,李颖晖,李哲. 飞行安全理论与分析[M]. 北京:科学出版社,2017:302.
- [10] 周海申. 航空气象学[M]. 北京:航空工业出版社,2020:103.
- [11] 张强,曹义华,钟国. 飞机机翼表面霜冰的三维数值模拟[J]. 航空动力学报,2010,25(6):1303-1309.
- [12] 张大林,陈维建. 飞机机翼表面霜状冰结冰过程的数值模拟[J]. 航空动力学报,2004(1):137-141.
- [13] 费景荣. 低速飞机积冰与小速度飞行[J]. 航空杂志,1997(1):28.
- [14] 桂业伟,周志宏,李颖晖,等. 关于飞机结冰的多重安全边界问题[J]. 航空学报,2017,38(2):6-17.

作者简介

费景荣 男,本科,教授。主要研究方向:飞行技术与飞行安全。E-mail: fjr_hi@163.com

才志超 男,硕士,副教授。主要研究方向:航空气象与飞行安全。E-mail: 26612231@qq.com

丁祥 男,硕士,副教授。主要研究方向:飞行技术与飞行安全。E-mail: dx1110@sina.com

Characteristics and risk management of the wing flow field after icing in a cruise configuration of a certain aircraft

FEI Jingrong* CAI Zhichao DING Xiang

(Naval Aviation University, Yantai 264001, China)

Abstract: In order to determine the risk control countermeasures after the ice accumulation under the cruise configuration of a turboprop aircraft, starting from the characteristics of the wing flow field, the relevant risks were analyzed and specific countermeasures were proposed. The results show that due to the influence of propeller slip flow and airfoil, the asymmetry of the separation of ice accumulation and air flow on both wings of the aircraft is an important feature that cannot be ignored, leading to a decrease in lift on the right wing and a decrease in the efficiency of the right aileron. The aircraft continues to roll right and pitch down, resulting in a sharp decrease in altitude. However, the relevant information does not consider this feature, and the description of the phenomenon and disposal after ice accumulation is not complete enough, which can easily lead to the pilots making mistakes and posing a high risk. Countermeasures include: attaching great importance to risk management when flying in iced areas. When flying in the ice zone, the speed must be selected according to the flight altitude and weight, the relevant principles should be followed, adjustment plates must be used correctly, and appropriate maneuvers should be made if necessary. Once the aircraft rolls abnormally to the right and the steering lever is unexpectedly deflected to the right, firstly the angle of attack should be reduced, then the slope be changed, and then the lever out of the dive be pulled. Strictly avoid instinctively pressing the rod at a high angle of attack, pulling the rod with a slope and other incorrect actions and avoid large side slip angles and flat tail negative angles of attack. The relevant expressions in the technical data should be improved through further research and demonstration.

Keywords: A turboprop aircraft; cruising configuration under the ice; wing flow field characteristics; risk control

* Corresponding author. E-mail: fjr_hi@163.com