

郝辛凯,倪洪波,倪萍,等. 基于试飞任务需求的阎良机场地面风特征研究[J]. 陕西气象,2024(4):53-60.

文章编号:1006-4354(2024)04-0053-08

基于试飞任务需求的阎良机场地面风特征研究

郝辛凯,倪洪波,倪萍,赵钰锦

(中国飞行试验研究院,西安 710089)

摘要:利用阎良机场2017—2021年地面气象观测风的资料,统计机场地面风的变化特征,分析特殊地形对地面风的影响,为保障试飞质量提供参考。结果表明:阎良机场盛行风向为东北风和西南风,主导风向为东北风;以东北风为主导风向时,风向昼间随时间呈顺时针偏转,夜间呈逆时针偏转,以西南风为主导风向时,风向昼夜随时间呈相反的变化;地面风表现出明显的地方性特征,不同路径的冷空气在受地形影响后,风向均趋向跑道方向的东北—西南向,风速除了受天气系统影响外,还兼有山谷风和峡谷风的特点;5 a平均风速为2.4 m/s,小风速科目试飞的气象条件较为充裕,也有一定的开展 ILS(CAT II)自动飞行科目试飞的气象条件,开展大侧风科目试飞的气象资源比较稀缺;春季和夏季风速较大,秋季和冬季较小,小风速科目试飞宜安排在9月—次年的2月期间,ILS(CAT II)自动飞行科目试飞宜安排在3—5月期间;风速日变化曲线表现为一峰一谷,峰值出现在12—18时,谷值出现在02—07时,可以将清晨和午后的机场资源让渡给小风速科目试飞,将 ILS(CAT II)自动飞行科目试飞安排在中午时段实施。

关键词:阎良机场;地形;风向;风速;试飞

中图分类号:P425.4;V321.2

文献标识码:A

地面风是重要的气象因素之一^[1-3],近年来,不少学者研究了风的时空分布特征^[4-11],为防灾减灾、工农业生产和环境保护等需求提供了丰富的研究成果。飞机起飞和着陆,通常是在逆风条件下进行^[12]。不同种类以及不同型号的飞机,起飞降落的风向风速边界条件都不相同,如果机场地面风向风速超过一定的阈值,飞机就不能正常起飞或降落,严重的甚至会威胁飞行安全。不同种类或型号的飞机,其起飞降落的风向风速边界条件,会通过设计验证、风洞试验、飞行试验等途径予以确定。为了验证新研制飞机的相关性能和品质,需要分别在小风速条件、规定风速的顺风、侧风和逆风条件,以及大侧风条件下开展飞行试验。

位于关中平原的阎良机场是国家级飞行试验基地,地面风向风速分布特征是重要的试飞气象资源,表明了其对与风相关科目飞行试验的承载能力。鲁渊平等^[13]关于陕西风速风向时空变化

特征研究,陈小婷等^[14]对陕西省近地面风场时空分布特征的研究,胡洵等^[15]对关中盆地近地面风场与输送特征的分析,对阎良机场捕捉和抓取风相关科目试飞气象条件提供了一定参考;但地面风常常表现出很强的局地性特征,受太阳辐射、天气系统和地形的影响明显^[16],使特定风向风速条件科目试飞决策、实施存在不确定性。基于试飞任务需求,结合机场地形地貌特征,研究阎良机场地面风的分布特征和演变规律,对协助相关部门决策不同条件风相关科目试飞的可行性,推荐适宜不同条件风相关科目试飞“窗口”,确保试飞安全,保证试飞进度,保障试飞质量和提升试飞效率有一定的参考价值 and 支撑作用。

1 数据资料及统计方法

选用阎良机场2017年1月1日—2021年12月31日整点地面观测2 min平均风向、风速资料,采用统计分析的方法对机场地面风的特征及

收稿日期:2023-07-08

作者简介:郝辛凯(1999—),男,汉族,陕西绥德人,学士,助理工程师,从事航空气象预报及飞行保障工作。

其影响因素进行分析^[17]。阎良机场的地面自动气象观测系统位于跑道中间地带距离跑道中心线 120 m 处,自动气象站装备含有以实时采集机场区域地面风向和风速的设备,每分钟自动采集并保存一组原始数据,每逢整点自动保存一组整点数据。观测时间统一采用北京时,以 24:00 为日界^[18]。测风观测点位于开阔的机场中间地带,距离地面 10 m,周围无高层建筑物遮挡,无树木阴影,不存在造成微观气候改变的情况,测风数据能够较准确地反映机场地面风的特征。同时,为客观真实反映阎良机场地面风对试飞科目的支撑程度,在统计中剔除由不稳定天气导致的风向风速突变数据。

2 试飞任务对风的需求

航空科研试飞任务对风的需求较为多样。概括起来,包括小风速科目试飞、大侧风科目试飞、ILS(CAT II)(II类精密进近)(仪表着陆系统 ILS,又称为盲降进近,是目前使用最广泛的飞机精密进近和着陆引导系统。ILS 分为 CAT I、CAT II、CAT III 三个等级,对应不同的能见度和决断高度)自动飞行科目试飞几个方面。这些试飞科目能否进行很大程度上取决于风向风速是否达到科研试飞的需求条件。常规科目试飞实施阶段,为防范和规避顺风对试飞安全的影响,当顺风平均风速 ≥ 5 m/s 时,需提醒和建议更换起降方向,或中止飞行(表 1)。

表 1 科研试飞对风向风速的需求

序号	试飞科目	试飞条件
1	小风速科目试飞	≤ 3 m/s 和 ≤ 5 m/s
2	大侧风科目试飞	侧风 11.8~18.0 m/s (23~35 kn)
3	ILS(CAT II) 顺风自动飞行	顺风 2.6~5.1 m/s (5~10 kn)
4	ILS(CAT II) 侧风自动飞行	侧风 7.7~11.3 m/s (15~22 kn)
5	ILS(CAT II) 逆风自动飞行	逆风 ≥ 12.9 m/s (≥ 25 kn)

3 地形对阎良机场风的影响

3.1 机场周边地形特征

山谷盆地等复杂地形的气象条件与具体地形

特征密切相关。实际地形走向、相对高差、位置错落等千差万别,使山地气象条件各有特色^[19]。阎良机场位于关中盆地北部。关中盆地北部为广阔的黄土高原台塬,自北向南坡度相对平缓,自西向东沟壑纵横,海拔高度在 1 000~1 500 m。南部为东西走向的秦岭山脉,海拔高度在 2 000 m 以上。盆地海拔高度从 350 m 至 500 m 不等,与周边山地的高差达 1 000 m 以上。关中盆地地势呈西高东低,渭河横贯其中,与汾河盆地隔黄河相望,形成了关中—汾渭平原东宽西窄的“喇叭形”地貌。关中盆地特殊的地形为该地区近地面大气流动构建了特殊的通道,使阎良机场地面主导风向为稳定的东北风和西南风,地面风速呈现出山谷风和峡谷风的特点。

3.2 地形对风向的影响

风向主要受大气环流影响,局地风向还受地形影响^[20]。影响阎良机场的冷空气路径主要为西路、西北路和北路。西路冷空气沿黄土高原东移,或西北路冷空气自西北向东南扩散,当冷空气主体位于 110°E 以西时,受秦岭山脉影响,阎良机场就以西南风为主。西北路冷空气主体东移过 110°E 时,或北路冷空气东移南下过程中,受到吕梁山的阻挡,自汾渭平原“喇叭口”倒灌进入关中平原,阎良机场以东北风为主。飞机都是逆风起降^[21],阎良机场风向分布特点与机场跑道方向基本平行,因此,风向对阎良机场试飞的影响很小。

3.3 地形对风速的影响

胡涛等^[15]将关中盆地风场分为系统控制型、弱天气背景型和局地环流型 3 类,全年出现日数比例分别为 8%、17.3% 和 74.7%,即关中盆地以山谷风日夜循环为特征的局地环流型风场最多。位于关中盆地的阎良机场,风速除了受到天气系统影响外,更多时段具有山谷风和峡谷风的特点。阎良机场西北部和北部的黄土高原海拔相对较高,日出以后,处于西北部、北部的高地受太阳直射,空气增温迅速,靠近渭河的机场区域上空同高度的空气距离地面较远,增温较慢,从而形成局地热力环流,下层风由机场区域吹向山坡,形成谷风。夜间,山坡辐射冷却快,导致气温下降迅速,机场上空同高度的空气冷却较慢,气温下降迟缓,

从而形成与昼间方向相反的局地热力环流,下层风由山坡吹向机场,形成山风。长期的观测表明^[14-15]:机场在弱气压场控制下,一般白天东北风会随时间向东南风偏转,风速 $<4\text{ m/s}$;夜间西南风会随时间向偏西风偏转,风速 $1\sim 3\text{ m/s}$;在日落后 1 h 左右,会出现风速短暂增大现象,瞬时风速可达 6 m/s 以上,持续 1 h 左右。这说明阎良机场存在较明显的山谷风,且多发生在天气形势调整、环流较弱、少云晴朗的天气条件下。同时,当来自偏东北的气流通过“喇叭口”向阎良机场西进时,受北部的黄土高原和南部的秦岭山脉逐渐收窄形成的峡谷影响,出现“狭管效应”,气流加速,风速会增大。阎良机场山谷风和峡谷风特点,在不同的与风相关科目试飞“窗口”选荐、天气预报、监测、预警和协同指挥过程中,都是需要考虑的因素。

4 地面风向特征

4.1 5 a 风向频率分布

风速偏小时,风向多变。为真实反映阎良机场风向日变化规律,以 $00\sim 23$ 时逐小时 2 min 平均风速 $\geq 3\text{ m/s}$ 为风向频率统计阈值。为确认 2 min 平均风速 $\geq 3\text{ m/s}$ 风向频率的代表性,统计发现,2017—2021年阎良机场各时刻 2 min 平均风速 $\geq 3\text{ m/s}$ 出现频率为 $82.6\%\sim 97.0\%$ (图1),平均为 90.1% ,其中,19时—次日08时之间, 2 min 平均风速 $\geq 3\text{ m/s}$ 的频率低于平均值,其余时段均大于平均值。

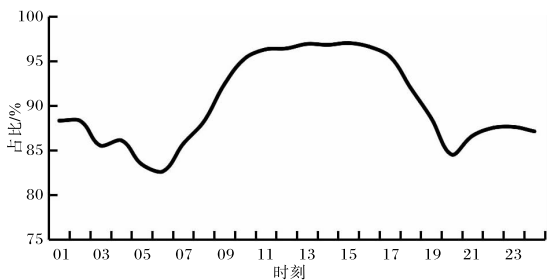


图1 2017—2021年阎良机场各时刻 2 min 平均风速 $\geq 3\text{ m/s}$ 出现频率

统计阎良机场 $\geq 3\text{ m/s}$ 的风向频率表明,主导风向以东北风和西南风为主,这与胡洵等^[15]的研究一致。阎良机场常年最多风向为东北($45^\circ\sim$

75°),频率为 20.0% ,另外,北东北($15^\circ\sim 45^\circ$)占 11.5% 。西南风($225^\circ\sim 255^\circ$)占 13.5% (图2)。

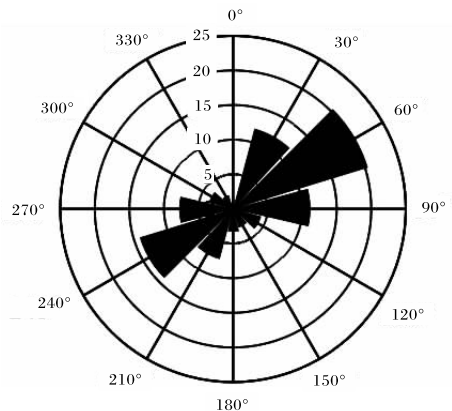


图2 2017—2021年阎良机场地面风向频率/%玫瑰图

4.2 风向频率月分布

图3为阎良机场逐月风向频率玫瑰图。全年盛行风向范围为 $45^\circ\sim 75^\circ$ 和 $225^\circ\sim 255^\circ$ 。其中,1—3月, $45^\circ\sim 75^\circ$ 风向频率呈逐月增加趋势,分别为 19.0% 、 19.0% 和 21.5% ; $225^\circ\sim 255^\circ$ 风向频率呈逐月降低趋势,分别为 15.2% 、 11.2% 和 11.6% 。4—5月, $45^\circ\sim 75^\circ$ 风向频率有所降低,分别为 20.5% 和 15.0% , $225^\circ\sim 255^\circ$ 风向频率有所增加,分别为 14.8% 和 18.7% 。6—7月, $45^\circ\sim 75^\circ$ 风向频率有所增加,分别为 18.3% 和 28.8% , $225^\circ\sim 255^\circ$ 风向频率有所降低,分别为 17.0% 和 10.0% 。8—10月, $45^\circ\sim 75^\circ$ 风向频率有所降低,分别为 26.9% 、 24.6% 和 19.2% , $225^\circ\sim 255^\circ$ 风向频率逐渐增加,分别为 10.2% 、 13.6% 和 16.3% 。11—12月, $45^\circ\sim 75^\circ$ 和 $225^\circ\sim 255^\circ$ 风向频率处于波动状态, $45^\circ\sim 75^\circ$ 风向频率分别为 15.4% 和 16.5% , $225^\circ\sim 255^\circ$ 风向频率分别为 16.3% 和 14.2% 。

总体上,阎良机场5—6月和10—11月西南风频率较大,分别为 18.7% 、 17.0% 和 16.3% 、 16.3% ,其余各月频率均 $\leq 16.0\%$,与此对应的是5月和11月东北风频率相对较低,分别为 15.0% 和 15.4% ,其余各月东北风频率均超过 16.0% ,最高为7月,频率达 28.8% 。另外,8—9月,东北风频率亦较高,为 26.9% 和 24.6% 。

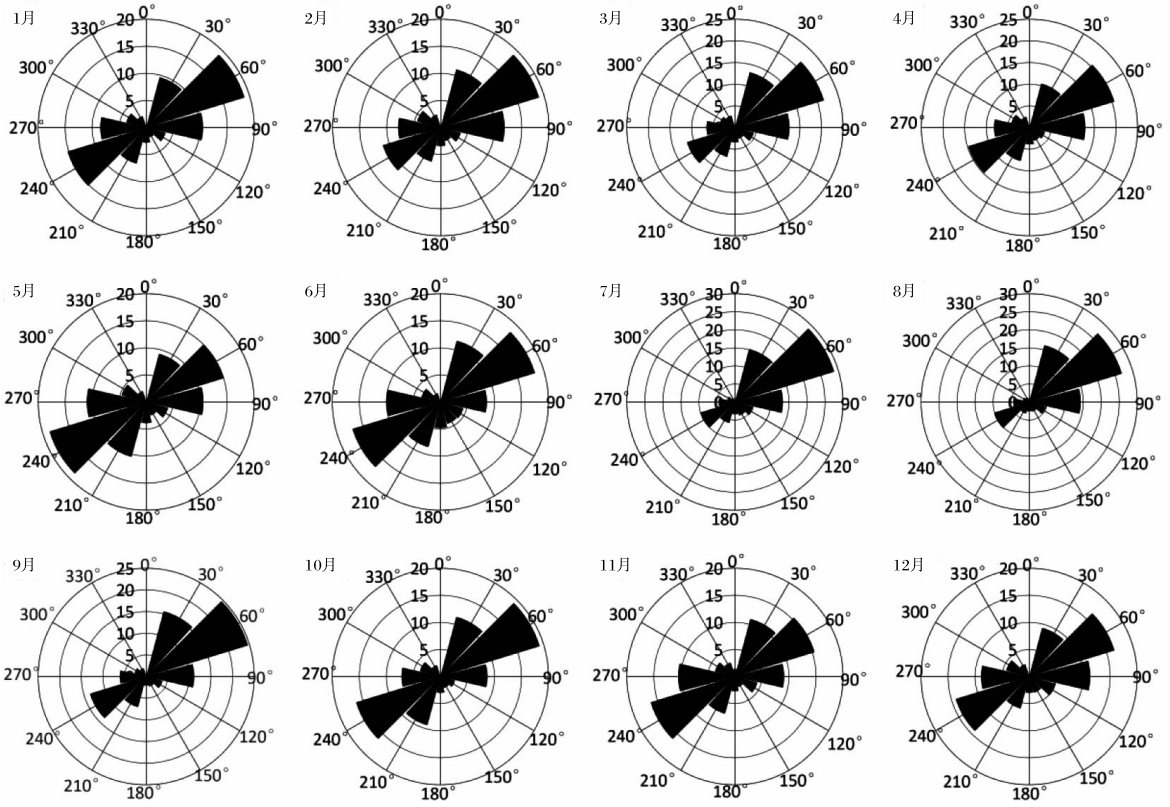


图3 2017—2021年阎良机场逐月地面风向频率/%玫瑰图

4.3 风向频率的日变化

图4为阎良机场地面逐时风向频率玫瑰图。

图中,15°~105°与195°~285°频率分布较其他风向明显偏高。其中15°~45°风在17时—次日06时

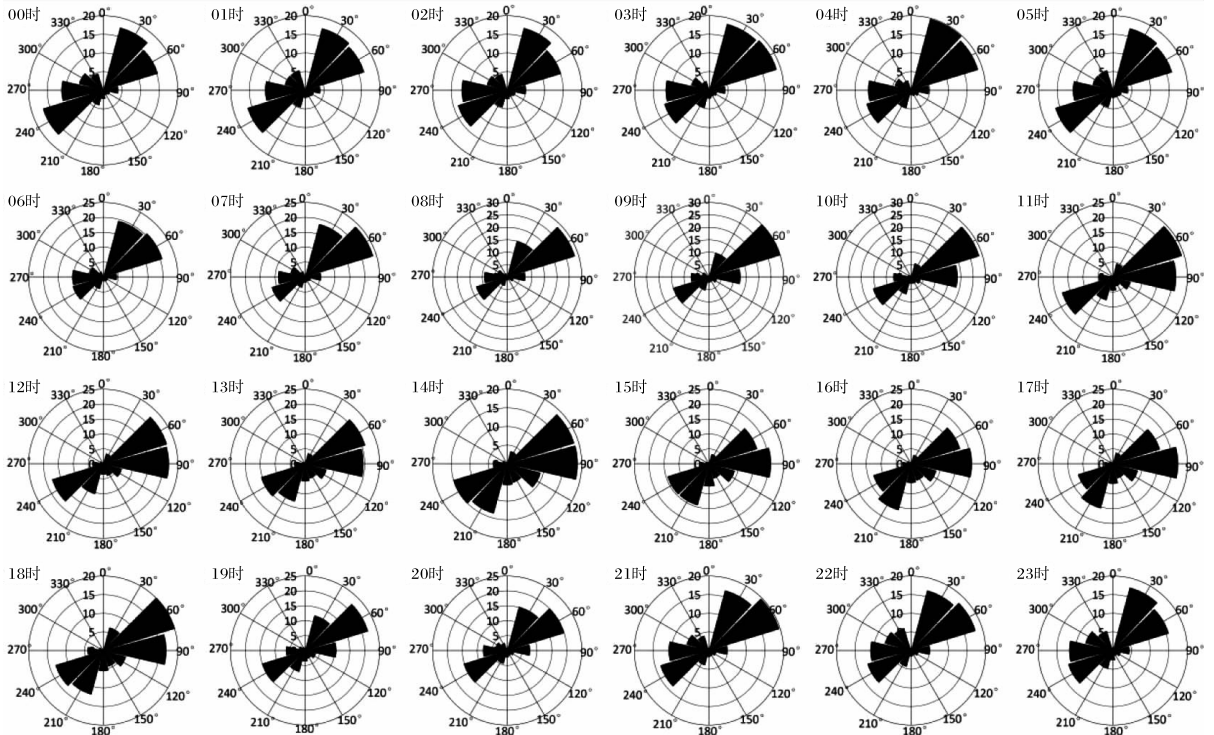


图4 2017—2021年阎良机场逐时地面风向频率/%玫瑰图

频率由 3.9% 增加至 19.5%, 在 07—16 时频率降低至 3.1%。45°~75° 风在 00—09 时频率由 15.3% 增加至 15°~105° 风中最高频率 30.0%, 在 10—17 时频率降低至 16.5%, 之后在 18—23 时频率在 16.0%~22.0% 之间波动。75°~105° 风在 08—12 时频率逐渐由 7.0% 增加至 22.0%, 在 13—17 时频率一直在 19.0%~22.0% 波动, 18 时—次日 07 时频率由 17.0% 降低至 5.0%。195°~225° 风在 10 时—17 时频率由 7.2% 增加至 16.1%, 18—21 时频率降低至 4.1%, 22 时—次日 09 时一直在 3.5%~6.0% 波动。225°~255° 风在 07—12 时频率由 11.7% 增加至 17.9%, 13—17 时逐渐降低至 12.2%, 18—20 时频率增加至 15.2%, 21 时—次日 06 时降低至 10.7%。255°~285° 风在 00—17 时频率由 11.2% 降低至 2.7%, 18—23 时增加至 11.7%。

分析表明, 阎良机场风向的日变化具有一定的规律。东北风为主导风向时, 昼间风向自 10 时前后开始呈顺时针方向偏转, 夜间自 18 时前后至次日 10 时风向呈逆时针方向偏转。西南风为主导风向时, 昼间风向自 11 时前后开始呈逆时针方向偏转, 夜间自 19 时前后开始至次日 11 时风向

呈顺时针方向偏转, 即阎良机场风向具有山谷风的特征。

5 地面风速特征

5.1 各风向的平均风速

图 5 为阎良机场 5 a 各风向段的平均风速。阎良机场各风向段的平均风速呈现出“双峰型”特征, 即 60° 风向段的平均风速最大为 3.2 m/s, 240° 风向段的平均风速次大, 为 2.6 m/s。除此之外, 西北偏北(300°~360°)风的平均风速较小, 最小为 0.7 m/s, 东南(120°~170°)风的平均风速亦较小, 最小为 1.4 m/s。表 2 说明在阎良机场小风速科目试飞(≤ 3 m/s 和 ≤ 5 m/s)的气象条件较为充裕, 也有一定的开展 ILS(CAT II)自动飞行顺风科目试飞(顺风 2.6~5.1 m/s)的气象条件, 开展大侧风科目试飞的气象资源则比较稀缺。

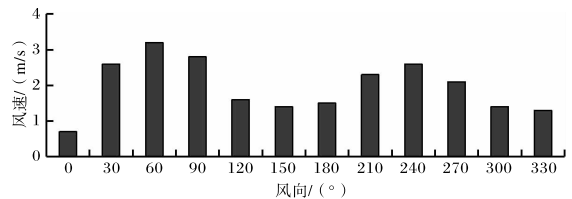


图 5 2017—2021 年阎良机场各风向段的平均风速

表 2 2017—2021 年阎良机场小风速及顺风科目试飞资源频率分布

试飞科目	风向/°	平均风速/(m/s)	时数/h	频率/%
小风速	0~360	≤ 3	30 083	68.9
		≤ 5	40 357	92.4
顺风	60	2.6~5.1	4 341	9.9
	240		2 687	6.2

5.2 平均风速的月变化

图 6 为阎良机场逐小时 2 min 平均风速的月分布。阎良机场 5 a 平均风速为 2.4 m/s。春季和夏季风速较大, 秋季和冬季风速较小, 与泾河站的风速分布相似^[15]。月平均风速呈“双峰型”分布, 即 4 月和 8 月平均风速较大, 分别为 2.9 m/s 和 2.8 m/s, 9 月—次年 2 月平均风速均 ≤ 2.4 m/s。

5.3 各风速段的风向频率

为了选荐阎良机场开展小风速科目和 ILS(CAT II)自动飞行科目试飞的“时间窗口”, 统计

阎良机场 2 min 平均风速不同区间的风向频率(图 7)。其中: 静风(平均风速 < 1 m/s)出现时数占总时数的 22.1%, 风向多变, 未统计其风向频率; 平均风速 1~3 m/s 的占总数的 49.0%, 其最多风向为 45°~75° 和 225°~255°; 3~5 m/s 的占总数的 23.5%, 对应的最多风向为 45°~75° 和 15°~45°, 之后为 225°~255°; 5~7 m/s 的占总数的 6.3%; 7~9 m/s 以及 > 9 m/s 的占总数的 1.2%。阎良机场较大风速基本出现在主导风向上, 这与关中地区大多数站点的特征相同^[15]。

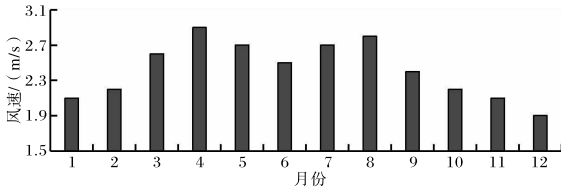


图6 2017—2021年阎良机场平均风速的月分布

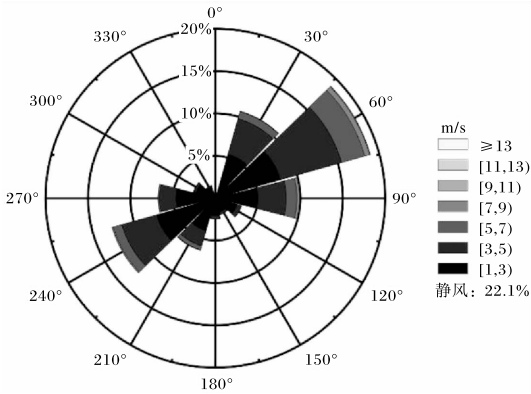


图7 2017—2021年阎良机场风向风速频率分布玫瑰图

由分析可知,阎良机场超过90%的时间适宜开展小风速科目试飞(≤ 3 m/s和 ≤ 5 m/s)。适宜开展 ILS(CAT II)顺风自动飞行科目试飞(顺风 2.6~5.1 m/s)的时间占比 23.5%,适宜开展 ILS(CAT II)侧风自动飞行科目试飞的时间占比低于2%,满足 ILS(CAT II)逆风自动飞行科目试飞的时间更少。

为防范阎良机场较大风速对试飞安全、进度、质量和效率的影响,对5 a中2 min平均风速 ≥ 13 m/s的6 d(共12 h)进行天气背景分析,发现此类天气主要出现在3—4月和7—8月,即冷空气活动频繁剧烈的春季和强对流天气频发的夏季(表略)。在春季及天气不稳定的条件下开展试飞(包括风相关科目试飞),均需要连续研判可能导致风向风速产生显著变化的因素,密切监测机场风场变化情况,及时发布天气预警,适时提出试飞气象保障建议。

5.4 平均风速日变化

图8为阎良机场春、夏、秋、冬四季平均风速日变化。平均风速日变化与太阳辐射强度密切相关,即日出后风速开始增大,16时达到峰值,之后开始减弱,07时前后风速最小。原因是日出前,大气温度低、湍流弱。日出后,地面接收来自太阳的热量加热空气,暖空气上升,近地层对流增强,

气层变得不稳定,上下层空气交换频繁,高空风动量下传,使下层空气加速,故午后湍流发展最强,近地面风速达到最大。日落前后,随着太阳辐射的逐步减弱,近地层对流减弱,风速开始减小。另外,阎良机场风速的日变化幅度春、夏季大于冬季,晴天大于阴天,也说明太阳辐射对地面风速日变化有一定的影响。据此,可以适当调整试飞任务时段,将清晨和傍晚的机场资源让渡给小风速科目试飞,将 ILS(CAT II)自动飞行科目试飞安排在中午时段实施,以保证试飞进度,提高试飞效率。

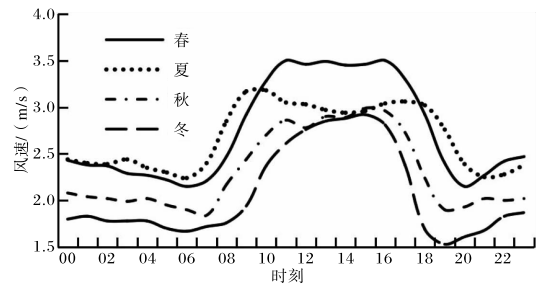


图8 2017—2021年阎良机场各季节平均风速日变化

6 科目可飞日

当日06—18时,连续出现 ≥ 3 个整点观测时次的2 min平均风速符合某一个科目的试飞条件,即为该科目的1个可飞日。由表3可知,

表3 2017—2021年阎良机场小风速及 ILS(CAT II)顺风科目试飞各月平均可飞日及月平均可飞日

月份	小风速试飞科目/d		顺风科目/d
	≤ 3 m/s	≤ 5 m/s	
1	28	30	13
2	21	26	11
3	19	28	18
4	14	28	20
5	15	28	24
6	14	29	20
7	14	29	23
8	13	28	25
9	17	29	20
10	23	30	15
11	24	29	13
12	30	31	10
平均	19	29	18

2017—2021年阎良机场小风速科目试飞的平均可飞日在秋季和冬季较多,春季和夏季相对较少。风速 ≤ 3 m/s的月平均可飞日为19 d,12月最多达30 d。风速 ≤ 5 m/s的平均可飞日为29 d,12月最多达31 d。ILS(CAT II)自动飞行顺风科目试飞的平均可飞日在春季和夏季较多,秋季和冬季较少。其中,8月最多达25 d,12月最少为10 d。以上分析说明阎良机场有比较充裕的小风速科目和ILS(CAT II)自动飞行顺风科目试飞的气象条件。

7 结论

针对试飞任务需求对阎良机场地面风向风速特征及科目可飞日进行分析,得到如下结论。

(1)关中盆地特殊的地形为该地区近地面大气流动构建了特殊的通道,使阎良机场全年盛行东北风和西南风,且具有山谷风和峡谷风的特点。5 a间东北风($45^\circ \sim 75^\circ$)频率达20.0%,西南风($225^\circ \sim 255^\circ$)频率为13.5%,但各月风向分布有差异。

(2)在2 min平均风速 ≥ 3 m/s的条件下,阎良机场风向的日变化具有一定的规律,在东北风为主导风向时,昼间风向自10时前后开始呈顺时针方向偏转,夜间自18时前后一次日10时风向呈逆时针方向偏转。在西南风为主导风向时,昼间风向自11时前后开始呈逆时针方向偏转,夜间自19时前后开始一次日11时风向呈顺时针方向偏转。此外,阎良机场5月和11月西南风频率较高,分别为18.3%和16.3%,东北风频率相对较低,分别为15.0%和15.4%。其余各月东北风频率均超过16.0%,最高为7月,高达28.8%。

(3)阎良机场各风向段的平均风速呈现“双峰型”特征,即 60° 风向和 240° 风向的平均风速较大,分别为3.2 m/s和2.6 m/s。西北偏北($300^\circ \sim 360^\circ$)和东南($120^\circ \sim 170^\circ$)风速相对较小,分别为0.7 m/s和1.4 m/s。阎良机场小风速科目试飞的气象条件较为充裕,也有一定的开展ILS(CAT II)自动飞行顺风科目试飞的气象条件,开展ILS(CAT II)自动飞行侧风、逆风科目和大侧风科目试飞的气象资源比较稀缺。

(4)阎良机场5 a平均风速为2.4 m/s。月平

均风速呈“双峰型”分布,春季和夏季风速较大,4月和8月平均风速分别为2.9 m/s和2.8 m/s,冬季风速较小,9月一次年2月平均风速均 ≤ 2.4 m/s。小风速科目试飞宜安排在9月一次年的2月,ILS(CAT II)自动飞行顺风科目试飞则宜安排在3—5月和7—8月,大侧风科目试飞应选择国内其他适宜机场实施。根据平均风速日变化特征,可以适当调整机场的试飞任务时段,在清晨和午后安排小风速科目试飞,将ILS(CAT II)自动飞行顺风科目试飞安排在中午时段实施。

(5)阎良机场5 a间小风速科目试飞的平均可飞日在秋季和冬季较多,春季和夏季相对较少。风速 ≤ 3 m/s的平均可飞日为19 d,12月最多达30 d。风速 ≤ 5 m/s的平均可飞日为29 d,12月最多达31 d。ILS(CAT II)自动飞行顺风科目试飞的平均可飞日在春季和夏季较多,秋季和冬季较少。其中,8月最多达25 d,12月最少为10 d。

参考文献:

- [1] 章澄昌. 飞行气象学[M]. 北京:气象出版社,2000:52.
- [2] KUHN M. Greenbelt and green heart: separating and integrating land scapes in European city regions [J]. Landscape and Urban Planning, 2003, 64(1/2): 19-27.
- [3] NGUYEN X T, GUNTER A, BERND H. Evaluation of urban land-use structures with a view to sustainable development [J]. Environmental Impact Assessment Review, 2002, 22(5): 475-492.
- [4] 荣艳淑, 梁嘉颖. 华北地区风速变化的分析[J]. 气象科学, 2008, 28(6): 655-658.
- [5] 程思, 陈鹏, 苗峻峰. 江苏省50 a近地面风速及气温的时空分布特征分析[J]. 气象水文海洋仪器, 2013(3): 121-124.
- [6] 王静, 苗峻峰, 冯文. 海南岛沿海近地面风时空分布特征的观测分析[J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版), 2016, 8(43): 226-238.
- [7] 郭海宇, 陈华忠, 汤翔宇, 等. 湖南省风的时空分布特征及大风概念模型研究[J]. 中低纬山地气象, 2019, 43(4): 55-59.
- [8] 孟丹, 陈正洪, 陈城, 等. 基于探空风资料的大气边

- 界层不同高度风速变化研究[J]. 气象, 2019, 45(12): 1756-1761.
- [9] 陈晔, 邱新法, 曾燕, 等. 沿海城市风场时空特征分析: 以福建省晋江市为例[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(31): 55-62.
- [10] 刘程. 深圳近地面风的时空特征研究[D]. 深圳: 中国科学院深圳先进技术研究院, 2020.
- [11] 杨君建. 1960—2021年商丘风速风向时空变化分析[J]. 农业灾害研究, 2022, 12(9): 132-135.
- [12] 赵树海. 航空气象学[M]. 北京: 气象出版社, 1993: 43.
- [13] 鲁渊平, 杜继稳, 侯建忠, 等. 陕西省风速风向时空变化特征[J]. 陕西气象, 2006(1): 1-4.
- [14] 陈小婷, 李培荣, 冯典, 等. 陕西省风的时空分布及ERA5风资料检验评估[J]. 陕西气象, 2023(3): 23-30.
- [15] 胡洵, 蔡旭晖, 宋宇, 等. 关中盆地近地面风场和大气输送特征分析[J]. 气候与环境研究, 2020, 25(6): 637-648.
- [16] 朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文, 等. 天气学原理和方法[M]. 北京: 气象出版社, 1979: 564-614.
- [17] 伍荣生. 现代天气学原理[M]. 北京: 高等教育出版社, 1999: 92-96.
- [18] 黄嘉佑. 气象统计分析与预报方法[M]. 北京: 气象出版社, 1990: 1-2.
- [19] LUTGENS F K, IARBUCK E J. The atmosphere: An introduction to meteorology (12th ed.) [M]. Boston: Pearson, 2013: 27-33.
- [20] 胡世祥. 西昌发射场风场模型[M]. 北京: 国防工业出版社, 1997: 13-15.
- [21] 顾战雄, 沈洪标, 王鹤饶. 不同气象条件对航班飞行的要求及影响[J]. 科技风, 2022(12): 82-84.