

基于飞机振动响应的 IRI 评价机场跑道平整度的适用性分析

齐麟,程美朋,杨帅,王强
(中国民航大学交通科学与工程学院,天津 300300)

摘要: 机场跑道平整度对飞机在跑道上平稳运行有着重要影响。国际平整度指数(IRI, international roughness index)是机场跑道平整度评价常用的指标,但 IRI 最初是针对公路平整度评价提出的指标,目前对于 IRI 评价机场跑道平整度的适用性分析研究不足。本文建立虚拟样机模型并验证了该模型的可靠性,在 IRI 相同的异构跑道、IRI 表征为平整的跑道和实测高程信息的跑道上分别进行飞机滑跑仿真分析,从而获得飞机振动响应数据,探究 IRI 与飞机振动响应的相关性。结果表明:在 IRI 相同的异构跑道上,飞机振动响应呈现出完全不同的结果;在 IRI 表征为平整的跑道上,飞机振动响应与 IRI 的相关性非常显著;不同起飞长度所得的 IRI 与飞机重心处和驾驶舱的竖向加速度均方根相关性较差,且实测 IRI 与飞机驾驶舱竖向加速度均方根相关性也较差。因此,采用 IRI 评价机场跑道平整度难以反映飞机真实的振动响应,建议在综合考虑飞机机型及其振动响应、滑跑速度的基础上,建立能够识别飞机滑跑不安全振动发生时刻和位置的跑道平整度评价指标。

关键词: 机场跑道;国际平整度指数(IRI);虚拟样机模型;振动响应;适用性

中图分类号: V351.11 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-5590(2026)01-0047-06

Applicability analysis of airport runway roughness evaluation using IRI based on aircraft vibration response

QI Lin, CHENG Meipeng, YANG Shuai, WANG Qiang
(College of Transportation Science and Engineering, CAUC, Tianjin 300300, China)

Abstract: Airport runway roughness has an important influence on the stable operation of aircraft on runways. The international roughness index (IRI) is a commonly used indicator for evaluating airport runway roughness, but IRI was originally proposed as an indicator for highway roughness evaluation, and current research on the applicability analysis of using IRI to evaluate airport runway roughness is insufficient. This paper establishes a virtual prototype model and verifies its reliability. Aircraft taxiing simulation analyses are conducted separately on heterogeneous runways with the same IRI, on runways characterized as smooth by IRI, and on runways with measured elevation information, to obtain aircraft vibration response data and investigate the correlation between IRI and aircraft vibration response. The results show that on heterogeneous runways with the same IRI, aircraft vibration responses exhibit completely different results, and on runways characterized as smooth by IRI, the correlation between aircraft vibration response and IRI is very strong. The correlation between IRI obtained from different take-off lengths and the root mean square of vertical accelerations at the aircraft center of gravity and cockpit is poor, and the correlation between measured IRI and the root mean square of vertical acceleration in the aircraft cockpit is also poor. Therefore, using IRI to evaluate airport runway roughness is difficult to reflect the true vibration response of aircraft, it is recommended to establish a runway roughness evaluation indicator capable of identifying the time and location when unsafe vibrations occur during aircraft taxiing, based on a comprehensive consideration of aircraft type, its vibration response and taxiing speed.

Key words: airport runway; international roughness index (IRI); virtual prototype model; vibration response; applicability

跑道是机场的核心功能区,承担着飞机的起飞、降落等活动。机场跑道平整度是指跑道表面相对于基准平面的竖向偏差^[1],是评价道面服役质量的重要指标^[2],同时也是影响飞机运行平稳性的重要因素之一。不平整的跑道会给飞机带来强烈的振动,影响飞行员操控的稳定性和旅客乘坐的舒适性^[3],同时还会增加关键部件的应力,造成飞机机械损坏,引发安全事故^[4]。因此,合理评价机场跑道平整度对于提升机场服务质量和保障机场运行安全具有重要意义。

国际平整度指数(IRI, international roughness index)是目前国内外常用的机场跑道平整度评价指标^[5-8]。最初,IRI 由世界银行基于 1/4 车辆模型在巴西的路面试验中提出^[9]。尽管 IRI 得到广泛使用,但采用其评价机场跑道平整度的合理性也受到了质疑。文献[10]基于实测数据研究了柔性和刚性 2 种机场跑道的 IRI 与直尺指数的关系。文献[11]研究了 IRI 与 3 m 直尺指数的相关性,为机场道面养护决策提供了参考。文献[12]建立了 IRI 与路面状况指数(PCI, pavement condition index)的关系并评估了机场跑道平整度。文献[13]建立了 IRI 与功率谱密度(PSD, power spectral density)之间的关系。文献[14]建立了飞机动载系数与飞机滑跑速度和 IRI 的关系式。文献[15]基于飞机滑跑过程中最大竖向加速度修正了 IRI 评价指标值。文献[16]优化了 IRI 的模型参数,提高了 IRI 与飞机振动响应的相关系数。目前关于 IRI 评价机场跑道平整度的研究集中于修正 IRI 模型或建立 IRI 与其他指标的关系式,缺少 IRI 评价机场跑道平整度可行性的定量分析。

鉴于此,本文首先建立了飞机虚拟样机模型并与美国联邦航空管理局(FAA, Federal Aviation Administration)公布的试验数据进行对比,验证了模型的可靠性;然后分别在 IRI 相同的异构跑道、IRI 表征平整的跑道、实测高程信息的跑道上模拟飞机滑跑过程,获取飞机在跑道不平整激励下的振动响应,并分析 IRI 与飞机振动响应的相关性,以定量分析的形式对 IRI 评价机场跑道平整度的适用性进行分析,可为改进机场跑道平整度的评价提供参考依据。

1 飞机虚拟样机模型

为了研究飞机滑跑过程的振动响应,需要建立飞机动力学模型。研究表明,采用虚拟样机技术建立的柔性体飞机模型比传统的刚体模型更加接近飞机真

实的振动响应^[17]。因此,本文针对目前常用机型 B737,基于虚拟样机技术,采用 Catia 软件对 B737 飞机模型进行精细化建模,之后导入到 Adams 软件中,计算飞机前起落架和主起落架的空气弹簧力、油液阻尼力,以及飞机重心位置和转动惯量^[18]。其中,在 Adams 软件中输入机身材料,定义各构件的约束,建立的 B737 飞机虚拟样机模型如图 1 所示,具体的飞机参数如表 1 所示^[19]。



图 1 飞机虚拟样机模型

Fig.1 Virtual prototype model of the aircraft

表 1 飞机模型参数表

Tab.1 Parameter table of the aircraft model

参数名称	数值
飞机最大起飞质量/kg	78 245
飞机最大滑行质量/kg	78 472
飞机最大降落质量/kg	65 317
x 轴转动惯量/(kg·m ²)	1 866 711
y 轴转动惯量/(kg·m ²)	3 394 953
z 轴转动惯量/(kg·m ²)	5 097 558
全长/m	39.47
翼展/m	34.32

为了验证本文建立的虚拟样机模型的可靠性,选取 FAA 试验所用的 6 条跑道高程信息^[20],并设置飞机虚拟样机模型以相同的速度进行滑跑仿真分析,得到飞机滑跑过程的振动响应数据,并与 FAA 的试验数据进行对比,结果如图 2 所示。

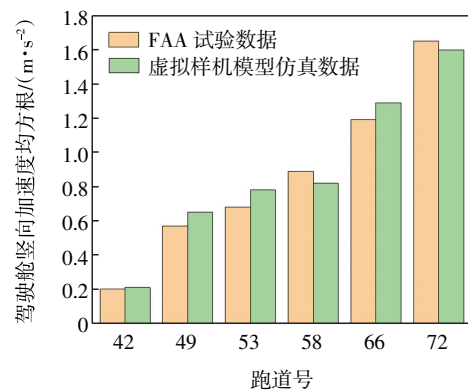


图 2 不同方法下 B737 驾驶舱竖向加速度均方根对比

Fig2. Comparison of the root mean square of vertical acceleration in the B737 cockpit under different methods

由图 2 可知,本文虚拟样机模型滑跑所得的驾驶舱竖向加速度均方根与 FAA 的实测振动响应数据较为接近,表明本文建立的虚拟样机模型是可靠的。

2 相同 IRI 的异构跑道上飞机滑跑振动响应分析

随着跑道服役时间的增长,在温度应力和飞机荷载等因素的作用下,跑道表面会出现一些起伏。基于此,本文选取 A、B、C 3 条跑道,并均在 1 000 m 长度范围内设置 2 处凸起,其他区域较为平整,设置凸起的长度为 10 m,最大高度为 0.1 m。其中,跑道 A 的 2 处凸起相距很近,跑道 B 的 2 处凸起相距适中,跑道 C 的 2 处凸起相距较远,3 条跑道高程图如图 3 所示。

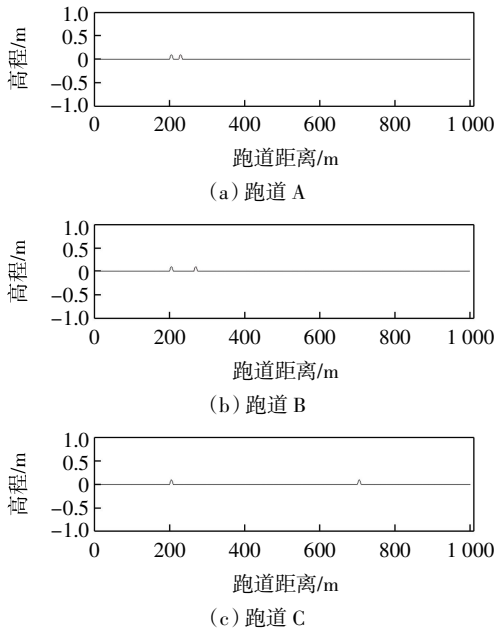


图 3 跑道 A、B、C 高程示意图

Fig3 Elevation schematic diagram of runways A, B and C

通过计算可知,3 条跑道的 IRI 相同,均为 0.75 m/km。为了研究飞机在 IRI 值相同的跑道上滑跑时是否有相同的振动响应,设定飞机的滑跑速度为 80~240 km/h,分别在 3 条跑道上模拟飞机滑跑过程,获取飞机振动响应数据,最终得到飞机重心处和驾驶舱的竖向加速度最大值,如图 4 和图 5 所示。

由图 4 和图 5 可知,飞机在 3 条 IRI 相同的异构跑道上模拟滑跑,得到的飞机重心处和驾驶舱的竖向加速度最大值均不相同。当飞机的滑跑速度为 240 km/h 时,跑道 A 上飞机重心处的竖向加速度最大值最大,为 14.01 m/s²;跑道 C 上飞机重心处的竖向加速度最大值最小,为 10.88 m/s²;跑道 B 上飞机重心处的竖向加速度最大值为 11.96 m/s²;与跑道 C 上飞机重心

处的竖向加速度最大值相比,跑道 A 增大了 28.77%,跑道 B 增大了 9.93%。同样,当飞机滑跑速度为 240 km/h 时,跑道 A 上飞机驾驶舱的竖向加速度最大值最大,为 16.27 m/s²;跑道 C 上飞机驾驶舱的竖向加速度最大值最小,为 13.02 m/s²;跑道 B 上飞机驾驶舱竖向加速度最大值为 13.54 m/s²;与跑道 C 上飞机驾驶舱的竖向加速度最大值相比,跑道 A 增大了 24.96%,跑道 B 增大了 3.99%。

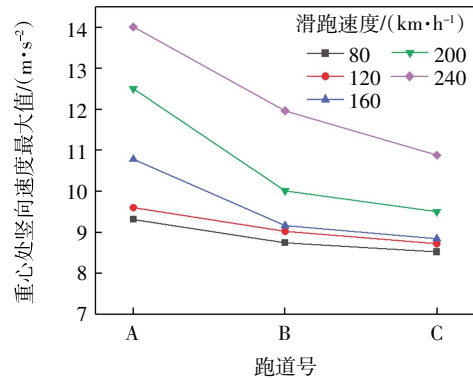


图 4 不同跑道飞机重心处竖向加速度最大值

Fig.4 Maximum vertical acceleration at the aircraft center of gravity over different runways

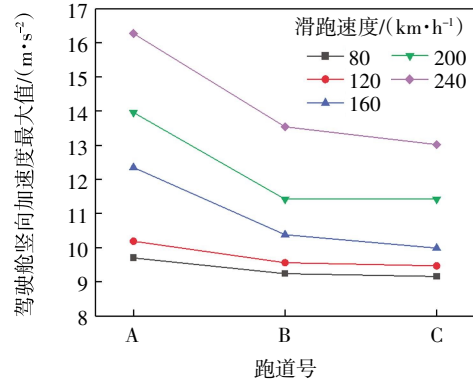


图 5 不同跑道飞机驾驶舱竖向加速度最大值

Fig.5 Maximum vertical acceleration in the aircraft cockpit over different runways

在跑道 A 和跑道 B 上滑跑时,飞机重心处和驾驶舱的竖向加速度最大值均大于跑道 C。这可能是由于跑道 A 和跑道 B 上的 2 处凸起相距较近,对飞机的振动响应起到了叠加作用,跑道 A 上的 2 处凸起相距更近,因此对飞机振动响应的叠加作用比跑道 B 更强烈一些;而跑道 C 的 2 处凸起相距较远,此时 2 个凸起对飞机振动响应没有叠加效应影响,所以飞机在跑道 C 上滑跑时其重心处和驾驶舱的竖向加速度最大值比较小。根据对比结果可知,即使 IRI 相同,飞机在不同跑道上滑跑也会有不同的振动响应。这是由于 IRI 计算的是平均值,可以反映跑道的平均起伏情况,所

对于IRI相同的异构跑道，其飞机的振动响应也可能差别很大，因此单纯采用IRI评价机场跑道平整度时，难以反映飞机滑跑过程中真实的振动响应。此外，由图4和图5可知，对于相同的跑道，在不同的滑跑速度下，飞机也会有不同的振动响应。实际起飞时，飞机滑跑过程中在跑道不同位置会有不同的速度，因此不能忽略速度对飞机振动响应产生的影响，而单纯采用IRI评价机场跑道平整度，忽略了速度对飞机振动响应的影响。

3 IRI表征平整的跑道上飞机滑跑振动响应分析

为进一步分析在IRI表征平整的跑道上飞机滑跑的振动响应，本文选择1条跑道，并在1000m长范围内设置3处连续凸起，其他区域较为平整，每个凸起的长度为10m，最大高度为0.1m，跑道的高程信息图如图6所示。

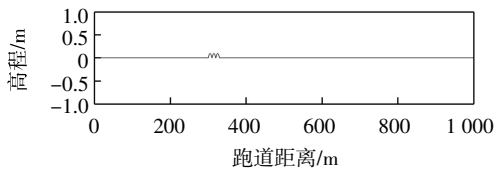


图6 IRI与飞机振动响应相关性分析的跑道高程示意图

Fig.6 Runway elevation schematic diagram for correlation analysis between IRI and aircraft vibration response

通过计算可知，本条跑道的IRI为0.81m/km。根据《民用机场道面评价管理技术规范》的规定^[5]，采用IRI评价本条跑道的平整度状况时，评价为“优”。采用建立的飞机虚拟样机模型在跑道上以不同的速度模拟滑跑，获取飞机的振动响应数据，不同速度下飞机重心处和驾驶舱的竖向加速度最大值如图7和图8所示。

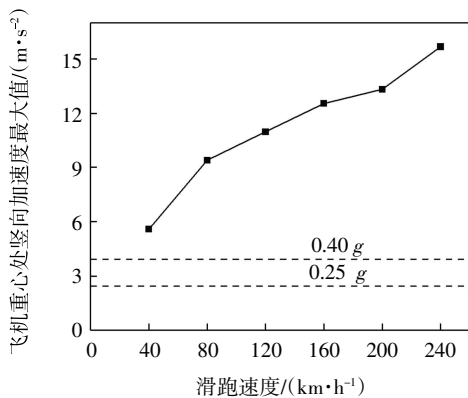


图7 不同滑跑速度下飞机重心处竖向加速度最大值

Fig.7 Maximum vertical acceleration at the aircraft center of gravity under different taxiing speeds

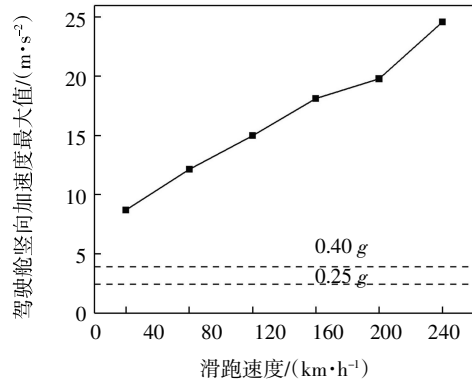


图8 不同滑跑速度下飞机驾驶舱竖向加速度最大值

Fig.8 Maximum vertical acceleration in the aircraft cockpit under different taxiing speeds

由图7可知，当飞机的滑跑速度为40km/h时，此时飞机重心处的竖向加速度最大值最小，为5.59m/s²；随着滑跑速度的增大，飞机重心处的竖向加速度最大值也在增大，在滑跑速度为240km/h时，达到15.68m/s²。由图8可知，当飞机的滑跑速度为40km/h时，此时飞机驾驶舱的竖向加速度最大值最小，为8.72m/s²；随着滑跑速度的增大，飞机驾驶舱的竖向加速度最大值也在增大，在滑跑速度为240km/h时，达到24.59m/s²。不同滑跑速度下，飞机重心处和驾驶舱的竖向加速度最大值均在0.40g($g \approx 9.80 \text{ m/s}^2$)以上，部分滑跑速度下，飞机重心处和驾驶舱的竖向加速度最大值已经远远超过了0.40g。波音公司的疲劳标准中规定，飞机在新建跑道滑跑时，振动响应产生的竖向加速度应小于0.25g，在旧跑道时应小于0.40g^[21]，而飞机以不同滑跑速度在此跑道上滑跑时的振动响应已经非常明显地超过了最低要求的标准，但采用IRI方法评价其跑道平整度为“优”。因此，上述分析表明采用IRI评价机场跑道平整度反映的是该条跑道的平均起伏情况，有时会带来不正确的评价结果。

4 真实道面上飞机滑跑振动响应分析

4.1 不同起飞长度下飞机滑跑振动响应分析

为了更直观地分析在实际跑道不平整激励下的飞机振动响应，采用水准仪测量一段不平整的道面高程信息并进行数据记录，计算不平整道面的IRI值，之后进行飞机滑跑仿真分析，分析飞机滑跑过程中的振动响应。本文选取机场某段道面作为测量对象，所测高程信息如图9所示。

B737的起飞距离一般为2000~3000m，以200m为间距，将飞机在跑道上的滑跑起飞距离分为2000、2200、2400、2600、2800、3000m。计算飞机以不同距

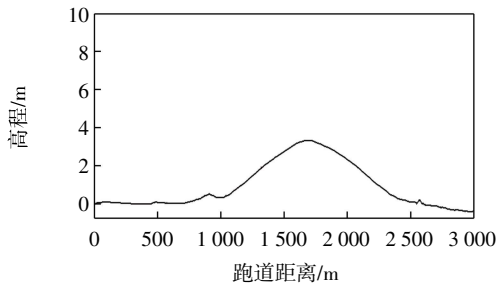


图 9 实测的跑道高程信息

Fig.9 Measured runway elevation information

离滑跑起飞时的道面 IRI 值。同时在实测高程信息的道面上模拟飞机的滑跑过程,获取跑道不平整激励下飞机的振动响应。按照不同的飞机滑跑起飞距离进行仿真分析,设置飞机的滑跑速度为 200 km/h,分别收集不同起飞距离下飞机重心处和驾驶舱的竖向加速度时程曲线。

为反映飞机在不同起飞距离下的飞机振动响应整体情况,计算不同起飞距离下道面对应的 IRI 值、飞机重心处和驾驶舱的竖向加速度均方根,结果如图 10 和图 11 所示。

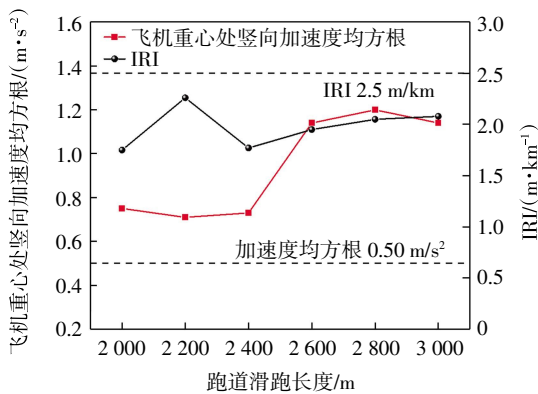


图 10 不同起飞距离道面 IRI 值和重心处竖向加速度均方根

Fig.10 Runway IRI values and root mean square of vertical acceleration at the center of gravity over different takeoff lengths

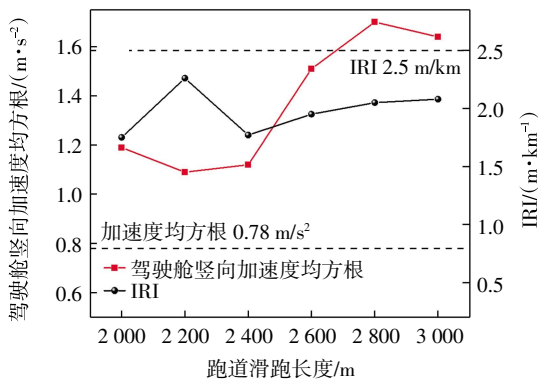


图 11 不同起飞距离道面 IRI 值和驾驶舱竖向加速度均方根

Fig.11 Runway IRI values and root mean square of vertical acceleration in the cockpit over different takeoff lengths

由图 10 和图 11 可知,IRI 与跑道的测量长度有关,取不同的测量长度,IRI 就会有不同的数值。不同起飞距离下,道面 IRI 值与飞机重心处和驾驶舱的竖向加速度均方根的变化趋势均相差较大,走势基本不一致,相关性较差。

根据文献[20],加速度均方根的评价标准如表 2 所示。由图 10 和图 11 可知,不同起飞距离下,IRI 值均位于 2.5 m/km 以下,跑道非常平整,而大部分起飞距离下飞机重心处和驾驶舱的竖向加速度均方根均大于 0.90 m/s²,说明在该条跑道上以不同起飞距离滑跑起飞时,大部分人会感觉非常不舒服。因此,IRI 不能有效反映跑道的不平整对飞机振动响应的影响,采用 IRI 评价机场跑道平整度可能会带来不正确的评价结果。

表 2 加速度均方根评价标准

Tab.2 Evaluation criteria for root mean square of acceleration

评价对象	可接受区	超过区	不可接受区
加速度均方根/(m·s ⁻²)	低于 10%的人不能接受(<0.47)	低于 50%的人不能接受(0.47~0.90)	超过 50%的人不能接受(>0.90)

4.2 实测 IRI 跑道上飞机滑跑振动响应分析

根据 FAA 驾驶舱模拟器在 37 条跑道上模拟滑跑时振动响应的实测数据^[20],分别计算 37 条跑道所对应的驾驶舱竖向加速度均方根,并对每条跑道的 IRI 和驾驶舱竖向加速度均方根进行统计分析。每条跑道所对应的 IRI 和驾驶舱竖向加速度均方根如图 12 所示。

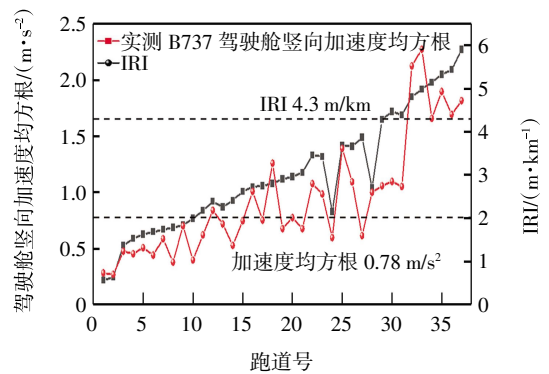


图 12 不同跑道所对应 IRI 及驾驶舱竖向加速度均方根

Fig.12 IRI and root mean square of vertical acceleration in the cockpit over different runways

由图 12 可以看出,各跑道所对应的 IRI 值和飞机驾驶舱竖向加速度均方根的变化趋势相差较大,走势基本不一致,相关性较差,因此采用 IRI 评价机场跑道平整度不能反映飞机真实的振动响应。

根据实测飞机振动响应,37 条跑道中有 24 条跑道驾驶舱的竖向加速度均方根大于 0.90 m/s²,即按照

表2中的评价标准,飞机在这些跑道滑跑时,有超过50%的人不能接受飞机的振动响应,说明飞机的振动响应显著,跑道的平整度较差。而37条跑道中有6条跑道的IRI大于4.3 m/km,即按照相关标准仅有6条跑道平整度评价为“次”。由此说明,采用IRI评价机场跑道平整度会带来不确定的评价结果,这主要是由于IRI评价机场跑道平整度反映的是某条跑道的平均起伏情况,并不能够识别飞机在不平整跑道上滑跑时产生不安全振动的时刻和位置。因此,建议综合考虑飞机振动响应的动力特性、飞机的滑跑速度和飞机机型,从而建立能够识别飞机在跑道上滑跑时不安全振动发生时刻和位置的机场跑道平整度评价指标。

5 结语

本文通过在IRI相同的异构跑道、IRI表征为平整的跑道和实测高程信息的跑道上分别进行飞机滑跑仿真分析,获得飞机振动响应数据,探究了使用IRI评价机场跑道平整度的适用性,可得到以下结论。

(1)在IRI相同的异构跑道上,飞机滑跑振动响应完全不同,表明采用IRI评价机场跑道平整度难以反映跑道不平整激励下的飞机真实振动响应。

(2)在IRI表征平整的跑道上,飞机也会有显著振动响应,由于IRI反映的是某条跑道的平均起伏情况,因而采用IRI评价机场跑道平整度存在评价结果不准确的情况。

(3)在实测跑道高程信息的跑道上,对比IRI值和飞机重心处与驾驶舱的竖向加速度均方根变化趋势,显示不同起飞距离下所得IRI与飞机重心处和驾驶舱的竖向加速度均方根相关性较差,且实测IRI与驾驶舱竖向加速度均方根相关性也较差。

(4)建议应综合考虑飞机振动特性、飞机滑跑速度和飞机机型,建立能够识别飞机在跑道上滑跑时不安全振动发生时刻和位置的机场跑道平整度评价指标,从而解决IRI与飞机振动响应相关性不高的问题。

参考文献:

[1] 中国民用航空局. 民用机场道面现场测试规程: MH/T 5110—2015[S]. 北京: 中国民用航空局, 2015.

[2] 董倩, 程少锋, 张献民, 等. 车路耦合荷载下沥青混凝土路面振动响应[J]. 北京航空航天大学学报, 2023, 49(9): 2385–2394.

[3] WOODS J, PAPAGIANNAKIS A T. Suitability of runway pavement roughness indices in capturing aircraft response[EB/OL]. (2009–12–31) [2024–12–31]. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID: 108025042>.

[4] EMERY S, HEFER A, HORAK E. Roughness of runways and significance of appropriate specifications and measurement[C]//11th Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa. Sun City: CAPSA Group, 2015.

[5] 中国民用航空局. 民用机场道面评价管理技术规范: MH/T 5024—2019[S]. 北京: 中国民用航空局, 2019.

[6] TRANSPORT CANADA. Measurement and evaluation of runway roughness: civil aviation, standards; advisory circular[R]. Ottawa, Canada: Transport Canada, 2015.

[7] HAYHOE G F. Airport pavement rideability rating for maintenance evaluation[C]//Proceedings of the 2016 Airports Conference, Hershey, PA, USA. 2016: 21–23.

[8] 钱劲松, 岑业波, 刘东亮, 等. 机场跑道全波段不平整测试方法[J]. 交通运输工程学报, 2021, 21(5): 84–93.

[9] SAYERS M W, GILLESPIE T D, QUEIROZ A V. The international road roughness experiment: establishing correlation and a calibration standard for measurements[R]. Washington DC: World Bank, 1986.

[10] MÚČKAP. Relationship between international roughness index and straightedge index[J]. Journal of Transportation Engineering, 2012, 138(9): 1099–1112.

[11] 凌建明, 刘诗福, 袁捷, 等. 机场道面平整度评价指标的相关性分析[J]. 公路交通科技, 2020, 37(3): 17–23.

[12] CERECEDA D, MEDEL-VERA C, ORTIZ M, et al. Roughness and condition prediction models for airfield pavements using digital image processing[J]. Automation in Construction, 2022, 139: 104325.

[13] SHI X G, CAI L C, WANG G H, et al. A new aircraft taxiing model based on filtering white noise method[J]. IEEE Access, 2020, 8: 10070–10087.

[14] 张献民, 陈新春, 李少波. 基于国际平整度指数IRI的飞机动载系数分析[J]. 南京航空航天大学学报, 2016, 48(1): 136–142.

[15] 刘诗福, 凌建明, 袁捷, 等. 基于竖向加速度响应的机场道面平整度评价及IRI标准反演[J]. 公路交通科技, 2017, 34(5): 57–64.

[16] TIAN Y, LIU S F, LIU L, et al. Optimization of international roughness index model parameters for sustainable runway[J]. Sustainability, 2021, 13(4): 2184.

[17] 齐麟, 怀永成, 潘慧, 等. 考虑非一致不平整激励的机场跑道平整度评价方法研究[J]. 振动与冲击, 2023, 42(15): 325–330.

[18] LIU S F, LING J M, TIAN Y, et al. Assessment of aircraft landing gear cumulative stroke to develop a new runway roughness evaluation index[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2022, 23(10): 3609–3620.

[19] BOEING COMMERCIAL AIRPLANES. 737 airplane characteristics for airport planning technical report[R]. Seattle: Boeing Commercial Airplanes, 2019.

[20] WILLIAM J. HUGHES TECHNICAL CENTER. Boeing 737–800 final surface roughness study data collection: DOT/FAA/TC–18/8[R]. Atlantic City: William J. Hughes Technical Center, 2017.

[21] 周晓青. 机场道面平整度评价指标研究[D]. 上海: 同济大学, 2006.

(责任编辑: 刘雅婷)