

机场柔性道面结构的飞机当量单轮荷载

胡洪龙^{1,2}, 谈至明¹, 朱唐亮¹, 王力¹

(1.同济大学道路与交通工程教育部重点实验室,上海,201804;

2.广西交通投资集团广西金盟工程有限公司,南宁,530000)

摘要 通过引入机场柔性道面结构的飞机当量单轮荷载系数 ζ 和旁邻轮影响系数 φ ;明确了当量单轮荷载的概念和计算公式。分别基于结构层层底弯拉应力、应变和土基顶面压应变设计指标,分析了主起落架构型分别为双轮、双轴双轮和三轴双轮的飞机当量单轮荷载系数 ζ 随机场道面结构参数的变化规律。研究表明:计算沥青面层层底弯拉应变,刚性、半刚性基层层底弯拉应力的当量单轮荷载系数 ζ 时仅考虑计一根(或一排)轴载的影响;计算土基顶面压应变的 ζ 时可计入所有旁邻轮的影响。最后,给出了基于结构层层底弯拉应力、应变和土基顶面压应变的40余种飞机的当量单轮荷载系数 ζ 的近似回归公式。

关键词 柔性道面;飞机;弯拉应力;土基压应变;当量单轮荷载

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2015.02.004

中图分类号 U 416 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2015)02-0015-04

Equivalent Single Wheel Load of Airport Flexible Pavement Structures

HU Hong-long^{1,2}, TAN Zhi-ming¹, ZHU Tang-liang¹, WANG Li¹

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Guangxi Jinmeng Engineering CO.LTD of Guangxi Communications Investment Group, Nanning 530000, China)

Abstract: In this paper, aircraft equivalent single wheel load coefficient ζ and adjacent wheel effect coefficient φ of airport flexible pavement structures are introduced, and the concepts and formula expressions of equivalent single wheel load are defined. Calculation methods of φ and ζ are introduced. Based on flexural tensile stress, strain at the bottom of structure layer and compressive strain on top of sub-grade, the rule of ζ with pavement structure parameters is analyzed when the main landing gear configuration of aircraft is dual wheel, dual tandem wheel or three axis wheel respectively. The paper suggests that in calculating ζ of flexural tensile strain at the bottom of asphalt layer and of flexural tensile stress at the bottom of rigid or semi-rigid base, the only one axle (or a row) load should be considered, and in calculating compressive strain on top of sub-grade, all adjacent wheels should be considered. At last, the approximate formulas of equivalent single wheel load coefficient for more than 40 kinds of aircraft based on flexural tensile stress, strain at the bottom of structure layer and compressive strain on top of sub-grade are given.

Key words: flexible airport pavement; aircraft; flexural tensile stress; sub-grade compressive strain; equivalent

收稿日期:2014-06-11

基金项目:交通部水运工程建设资助项目(JSKF-W-201201)

作者简介:胡洪龙(1988—),男,安徽蚌埠人,博士,主要从事铺面工程研究.E-mail: 2007weishenme@sina.com

引用格式: 胡洪龙,谈至明,朱唐亮,等. 机场柔性道面结构的飞机当量单轮荷载[J]. 空军工程大学学报:自然科学版,2015,16(2):15-18. HU Hong-long, TAN Zhi-ming, ZHU Tang-liang, et al. Equivalent Single Wheel Load of Airport Flexible Pavement Structures[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2015, 16(2): 15-18.

lent single wheel load

随着飞机工业的发展,飞机荷载越来越复杂,不仅有双轮荷载,还出现了双轴双轮、三轴双轮荷载等,对道面结构的当量单轮荷载的研究尤为重要^[1]。

黄仰贤应用波密斯特双层理论,假设单轮和双轮具有同样的接触压力,对各种因素对当量单轮荷载的影响进行了理论研究^[2-3]。Gerrard(盖勒)和Harrison(哈利逊)假设所有车轮具有相同的接触半径,对单轮、双轮和双轴双轮进行了类似的研究^[4]。ICAO(国际民航组织)颁布的ACN-PCN法(飞机等级号-道面等级号)明确了飞机的当量单轮荷载的计算过程,但允许不同国家或地区采用各自的计算道面的当量单轮荷载的方法^[5]。我国《民用机场沥青混凝土道面设计规范(MH 5010-1999)》将某一主起落架构型对道面的作用按弯沉相等的原则换算成当量单轮荷载^[6]。英国、澳大利亚等国将当量单轮荷载的概念引入到港口铺面结构设计当中,车轮荷载的径向、切向应力直接采用半空间体上作用一集中力的布辛尼斯克公式进行估算^[7-9]。

国内外对当量单轮荷载的计算方法还没有统一的定论。层状弹性理论较半空间无限体更符合道面的实际状况,但道面设计指标应与道面损坏类型相对应,不同道面设计指标相对应的道面结构的当量单轮荷载也应有所区别。

文献[10]为考虑港区繁杂的40多种荷载对港区铺面结构的影响,将当量单轮荷载明确定义为:荷载圆半径按某一轮接地面积计,荷载量按其产生的指标值与多轮荷载产生的铺面结构的“指定”设计指标值相等的条件得出。通过引入当量单轮荷载系数和旁邻轮影响系数,建立了当量单轮荷载系数与铺面结构参数的回归关系式。飞机的主起落架类型较多,主要分为双轮、双轴双轮和三轴双轮,主起落架车轮间距和轴距都不尽相同。不同构型的起落架,即便在总重相等的情况下,对道面结构的影响也不尽相同。本文应用文献[10]中的理论和方法研究飞机主起落架对道面结构的影响。

1 结构层弯拉应力、应变的当量单轮荷载系数

1.1 双轮

主起落架构型为双轮的飞机,主起落架有2个,主起落架轮距 $S_i = 0.71 \sim 0.93$ m,主起落架间距 $W = 5.09 \sim 7.60$ m,见图1。由于主起落架间距较大,

在计算当量单轮荷载系数时仅计单侧1个主起落架的2个轮载。

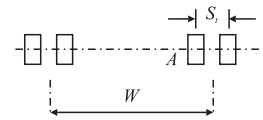


图1 双轮的主起落架构型

Fig.1 The main landing gear configuration of dual wheels

沥青面层层底弯拉应变,刚性、半刚性基层层底弯拉应力的最大值发生在图1中的A点,飞机通过A点时,道面结构效应在A点产生的最大峰值只有一次。道面设计按飞机最大滑行重力计时,结构层层底弯拉应力、应变的当量单轮荷载系数 ζ 随道面结构的刚度半径 l 的增加而增加,随着上下层广义模量比 $\lambda_E = \frac{1 - \mu_0^2 E_1}{1 - \mu_1^2 E_0}$, E_1 、 μ_1 和 E_0 、 μ_0 分别为上、下层的弹性模量和泊松比)的增加而减小。 $l = 0.6 \sim 2.0$ m、 $\lambda_E = 10 \sim 100$ 时,当量单轮荷载系数 ζ 在1.20 ~ 1.78范围内变化。

按飞机最大着陆重力计时的 ζ 值比飞机最大滑行重力计时的 ζ 略小,两者最大相差不超过0.02,故在计算 ζ 时可不考虑这一差异(文中无特别说明,均按最大滑行重力计)。

1.2 双轴双轮

主起落架构型为双轴双轮的飞机,荷载图见图2。图2(a)的机型主起落架有2个,其轮距 $S_i = 0.78 \sim 1.40$ m,轴距 $S_{L1} = 1.01 \sim 1.98$ m, S_{L1} 总大于 S_i ,主起落架间距 $W = 7.32 \sim 11$ m;图2(b)的机型。主要为B747及其改进型,有4个主起落架其轮距 $S_i = 1.10 \sim 1.12$ m,轴距 $S_{L1} = 1.37 \sim 1.47$ m,主起落架间距 W_1 和 W_2 分别为3.84 m和11 m。

对于如图2(a)所示主起落架间距相同的机型,由于主起落架间距较大,可仅考虑单侧的1个主起落架。经验算,对于A点而言,计单侧2根轴4个轮载的当量单轮荷载系数 ζ' 值与仅计单侧1根轴2个轮载的 ζ 值的偏差 $(\zeta' - \zeta)$ 很小,且为负值,故可仅计1根轴上的2个轮载,峰值出现次数按2次计。 $l = 0.6 \sim 2.0$ m、 $\lambda_E = 10 \sim 100$ 时, $\zeta = 1.10 \sim 1.65$ 。

对于如图2(b)所示主起落架间距不同的机型,由于前后主起落架间距不同且相距较远,可仅考虑间距较近的2个主起落架的相互影响,即类似图2(a)所示的8个轮载的相互影响。又由上面的分析可知,计两根轴时计算得到的 ζ' 更小,故建议在计算 ζ 值时考虑1排4个轮载。按此方法计算得到的 ζ 在1.17 ~ 1.86之间(l 、 λ_E 取值同前)。道面结构效

应的峰值按 2 次计。

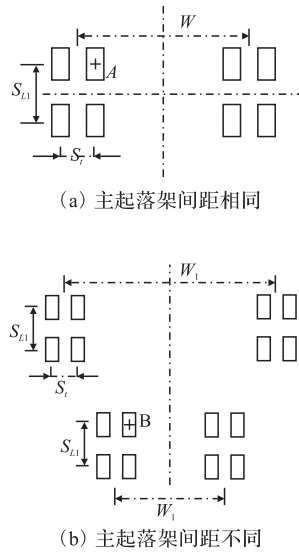


图 2 双轴双轮的主起落架构型
 Fig.2 The main landing gear configuration of double axles-dual wheelc

1.3 三轴双轮

B777 和 A380 - 800 型飞机的主起落架有 2 个, 构型为三轴双轮, 荷载图式见图 3。主起落架轮距 $S_L = 1.40 \sim 1.53$ m, 轴距 $S_{L1} = 1.45 \sim 1.70$ m, $S_{L2} = 1.45 \sim 1.70$ m, 主起落架间距 $W = 5.26 \sim 11$ m。由于主起落架间距较大, 计算时可仅考虑单侧 1 个主起落架 3 根轴载的迭加。

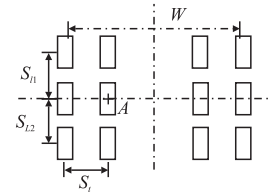


图 3 三轴双轮的主起落架构型
 Fig.3 The main landing gear configuration of double axles-dual wheelc

对于主起落架构型为三轴双轮的飞机, 沥青面层弯拉应变, 刚性、半刚性基层弯拉应力的最大值发生在图 3 中的 A 点, 计单侧横向 1 根轴 2 个轮载和计纵向一排 3 个轮载时, 道面结构的当量单轮荷载系数 ζ 见表 1。

表 1 主起落架构型为三轴双轮的飞机的当量单轮荷载系数 ζ
 Tab.1 The equivalent single wheel load coefficient ζ of three axlesdual wheels aircraft

| 计算方法 | 机型 | 主起落架重量 /kN | 主起落架轮距/m | | | 刚度半径 l /m | | | | | | | |
|---------------------|------------|------------|----------|----------|----------|-------------|------|------|------|------|------|------|------|
| | | | S_L | S_{L1} | S_{L2} | 0.6 | 0.8 | 1.0 | 1.2 | 1.4 | 1.6 | 1.8 | 2.0 |
| 计横向 一根轴 2 个轮载 | B777-200 | 2 865 | 1.40 | 1.45 | 1.45 | 1.10 | 1.17 | 1.23 | 1.29 | 1.34 | 1.39 | 1.43 | 1.46 |
| | B777-200LR | 3 200 | 1.40 | 1.45 | 1.48 | | | | | | | | |
| | B777-300 | 2 847 | 1.40 | 1.45 | 1.45 | | | | | | | | |
| | B777-300ER | 3 193 | 1.40 | 1.45 | 1.48 | | | | | | | | |
| | A380-800 | 3 203 | 1.53 | 1.70 | 1.70 | | | | | | | | |
| 计纵向 一排 3 个轮载 | B777-200 | 2 865 | 1.40 | 1.45 | 1.45 | 1.18 | 1.31 | 1.44 | 1.56 | 1.66 | 1.75 | 1.83 | 1.90 |
| | B777-200LR | 3 200 | 1.40 | 1.45 | 1.48 | | | | | | | | |
| | B777-300 | 2 847 | 1.40 | 1.45 | 1.45 | | | | | | | | |
| | B777-300ER | 3193 | 1.40 | 1.45 | 1.48 | | | | | | | | |
| | A380-800 | 3 203 | 1.53 | 1.70 | 1.70 | | | | | | | | |

从表中数据可以看出, 计纵向一排 3 个轮载时的 ζ 值要明显大于计单侧横向 1 根轴 2 个轮载时的 ζ 值。因此建议对于主起落架构型为三轴双轮的飞机, 在计算 φ_b 時計纵向一排 3 个轮载。

前后轴通过 A 点时的 ζ 值比中轴通过 A 点时的 ζ 值要小, 两者比值在 0.86~0.99 之间, 为安全起见, 可保守地忽略其差异, 峰值出现次数均计 3 次。

2 土基顶面压应变的当量单轮荷载系数

基于土基压应变指标的当量单轮荷载系数 ζ 计

算过程较为简单, 建议在计算时考虑所有轮载的相互影响。道面设计按飞机最大滑行重力计或按最大着陆重力计时的当量单轮荷载系数 ζ 相差不会超过 0.03, 可忽略不计。

当量单轮荷载系数 ζ 仅与道面结构刚度半径 l 有关, 其值随着 l 的增加而增加。对于主起落架分别为双轮、双轴双轮、三轴双轮的飞机在 $l = 0.6 \sim 2.0$ m, $\lambda_E = 10 \sim 100$ 时, ζ 分别在 1.23~1.83, 1.11~3.22, 1.16~3.27 范围内变化, 道面结构效应的峰值分别计 1 次、2 次、3 次。

3 当量单轮荷载系数的近似计算

对于沥青面层层底弯拉应变,刚性、半刚性基层的弯拉应力而言,当量单轮荷载只需计 1 根(或 1 排)轴载的影响。上下层模量比 $\lambda_E = 20$ 时,当量单轮荷载系数 ζ_{20} 与刚度半径 l 的关系可用二次抛物

线的形式来表示:

$$\zeta_{20} = A_b l^2 + B_b l + 1 \tag{1}$$

式中: l 为刚度半径,对于沥青面层层底弯拉应变,为沥青面层的刚度半径;对于刚性、半刚性基层的弯拉应力,为面、基层的刚度半径;

A_b, B_b 为回归系数,见表 2。

表 2 回归系数 A_b, B_b, C_b, A_z, B_z 取值

Tab.2 The value of regression coefficient A_b, B_b, C_b, A_z, B_z

| 机型 | 主起落架轮距/m | | | 回归系数 | | | | | 峰值出现次数 | |
|--|----------|-------|----------|----------|--------|-------|-------|--------|--------|-------|
| | 构型 | S_t | S_{L1} | S_{L2} | A_b | B_b | C_b | A_z | | B_z |
| B737-200,300、400A,500 | 双轮 | 0.78 | — | — | -0.074 | 0.536 | 0.085 | -0.083 | 0.576 | 1 |
| B737-600,700、800,900 | | 0.86 | — | — | -0.055 | 0.473 | 0.088 | -0.065 | 0.514 | |
| A318,A319、A321 | | 0.93 | — | — | -0.066 | 0.458 | 0.085 | -0.078 | 0.501 | |
| MD-90 | | 0.71 | — | — | -0.104 | 0.612 | 0.079 | -0.113 | 0.651 | |
| A320 | 双轴双轮 | 0.78 | 1.01 | — | -0.107 | 0.537 | 0.088 | -0.167 | 1.283 | 2 |
| B757-200,200pf | | 0.86 | 1.14 | — | -0.091 | 0.495 | 0.088 | -0.091 | 1.092 | |
| B767-200,200 ER、300,300ER | | 1.14 | 1.42 | — | -0.021 | 0.278 | 0.096 | 0.079 | 0.638 | |
| A300 | | 0.89 | 1.40 | — | -0.093 | 0.497 | 0.084 | -0.015 | 0.880 | |
| A310-200 | | 0.93 | 1.40 | — | -0.066 | 0.435 | 0.093 | 0.015 | 0.802 | |
| MD-11 | | 1.37 | 1.63 | — | 0.008 | 0.230 | 0.101 | 0.161 | 0.387 | |
| A330-200,300 A340-200,300,500,600 | 双轴双轮 | 1.40 | 1.98 | — | 0.008 | 0.230 | 0.101 | 0.191 | 0.251 | |
| B747-200B,300,400、400 DOMESTIC、400F,400COMBI | | 1.12 | 1.47 | — | 0.055 | 0.341 | 0.099 | 0.329 | 0.501 | |
| B747SP | | 1.10 | 1.37 | — | | | | | | |
| B777-200,300 | 三轴双轮 | 1.40 | 1.45 | 1.45 | 0.037 | 0.391 | 0.105 | 0.258 | 0.688 | 3 |
| B777-200LR,300 ER | | 1.40 | 1.45 | 1.48 | | | | | | |
| A380-800 | | 1.40 | 1.45 | 1.45 | | | | | | |

进一步研究表明: ζ 还与上下层的广义模量比 λ_E 有关。 λ_E 变化时的 ζ 与 $\lambda_E = 20$ 时关系如下:

$$\zeta = \zeta_{20} + C_b (1 - \zeta_{20}) \ln\left(\frac{\lambda_E}{20}\right) \tag{2}$$

式中: C_b 为回归系数,不同机型的 C_b 值见表 2。

土基压应变的当量单轮荷载系数 ζ 仅与面、基层刚度半径 l 有关,其回归表达式为:

$$\zeta = A_z l^2 + B_z l + 1 \tag{3}$$

式中: A_z, B_z 为回归系数,见表 2。

算方法,简化和解决了多轮荷载对机场道面结构的影响问题,完善了当量单轮荷载概念在铺面结构(港区铺面、机场道面)中的推广和应用。对于沥青面层层底弯拉应变,刚性、半刚性基层层底弯拉应力, $l = 0.6 \sim 2.0$ m, $\lambda_E = 10 \sim 100$ 时, $\zeta = 1.20 \sim 1.78$ (双轮)、 $1.10 \sim 1.86$ (双轴双轮)、 $1.08 \sim 1.90$ (三轴双轮);对于土基顶面压应变, $\zeta = 1.23 \sim 1.83$ (双轮)、 $1.11 \sim 3.22$ (双轴双轮)、 $1.16 \sim 3.27$ (三轴双轮)。具体取值时, ζ 可按文中第 3 节给出的近似回归式计算得到。

4 结语

(下转第 42 页)

本文使用文献[10]中当量单轮荷载的概念和计

- [4] Anderson E P. Real-Time Dynamic Trajectory Smoothing for Unmanned Air Vehicles[J]. IEEE Transactions on control systems technology, 2005, 5(3):471-477.
- [5] 胡中华, 赵敏, 姚敏. 无人机三维航路规划技术研究及发展趋势[J]. 技术, 2009, 29(6):6-9.
HU Zhonghua, ZHAO Min, YAO Min. Research and Development Trend of 3-D Route Planning for UAV[J]. Metrology and Measurement Technology, 2009, 29(6):6-9. (in Chinese)
- [6] 赵锋, 杨伟, 杨朝旭, 等. 无人机三维航路动态规划及导引控制研究[J]. 计算机工程与应用, 2014, 50(2):58-64.
ZHAO Feng, YANG Wei, YANG Zhaoxu, et al. UAV Three-Dimensional Dynamic Route Planning and Guidance Control Research[J]. Computer Engineering and Applications, 2014, 50(2):58-64. (in Chinese)
- [7] 曹晖, 王瑾, 李寰宇, 等. 基于改进粒子群算法的对地攻击最优航迹规划[J]. 空军工程大学学报:自然科学版, 2013, 14(1):20-24.
CAO Hui, WANG Jin, LI Huanyu, et al. Air to Ground Attack Route Planning by Using Method of PSO[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2013, 14(1):20-24. (in Chinese)
- [8] 王铀, 赵辉, 臧守飞, 等. 考虑多约束的UCAV对地攻击轨迹规划[J]. 空军工程大学学报:自然科学版, 2012, 13(6):6-10.
WANG You, ZHAO Hui, ZANG Shoufei, et al. Research on Air-to-ground Trajectory Planning for UCAVs Considering Multi-restriction[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2012, 13(6):6-10. (in Chinese)
- [9] 黄丁才, 牛轶峰, 沈林成, 等. 基于图像质量的无人侦察机航线规划[J]. 微计算机信息, 2010, 26(9):186-188.
HUANG Dingcai, NIU Yifeng, SHEN Lincheng, et al. A Path Planning Based on the Image Quality for Unmanned Reconnaissance Air Vehicles[J]. Microcomputer Information, 2010, 26(9):186-188. (in Chinese)
- [10] FAS. FAS Intelligence Resource Program national Imagery Interpretability Rating Scales[EB/OL] (2008-02-01)[2014-07-01]. <http://www.fas.org/irp/imint/niirs.html>.
- [11] Kennedy J, Eberhart R. Particle swarm optimization [C]//In Proceedings of the 4th IEEE International Conference on Neural Networks. Piscataway: IEEE Service Center, 1995:1942-1948.
- [12] Ling S H, Iu H C F, Leung H F, et al. Improved Hybrid Particle Swarm Optimized Wavelet Neural Network for Modeling the Development of Fluid Dispensing for Electronic Packaging [J]. IEEE Trans Ind Electron, 2008, 55(9):3447-3460.

(编辑:徐敏)

+++++
(上接第 18 页)

参考文献(References):

- [1] 黄仰贤.路面分析与设计[M].余定选,齐诚,译.北京:人民交通出版社,1998.
Huang Y H. Pavement Analysis and Design [M]. YU Dingxuan, QI Cheng, translated. Beijing: China Communication Press, 1998. (in Chinese)
- [2] Huang Y H. Chart for Determining Equivalent Single-Wheel loads [J]. Journal of Highway Division [J]. ASCE, 1968, 94:115.
- [3] Huang Y H. Influence Charts for Two Layer Elastic Foundations [J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division [J]. ASCE, 1969, 95:709.
- [4] Gerrard C M, Harrison W J. A Theoretical Comparison of the Effects of Dual-Tandem and Dual-wheel Assemblies on Pavements [J]. Australian Road Research Board, 1970, 5(4):112.
- [5] ICAO. Aerodrome Design Manual (Part 3): Pavements [M]. 2nd ed. Montreal: International Civil Aviation Organization, 1983.
- [6] 中华人民共和国行业标准.民用机场沥青混凝土道面设计规范(MH 5010-1999)[S].北京:中国民用航空总局, 2000.
Ministry of Transport of the People's Republic of China MH 5010-1999 Specification of Civil Airport Concrete Pavement Design [S]. Beijing: Civil Aviation Administration of China, 2000. (in Chinese)
- [7] John Knapton. The Structural Design of Heavy Duty Pavement for Ports and Other Industries [M]. 3rd edition. London: British Precast Concrete Federation, 1996.
- [8] John Knapton. Heavy Duty Pavement for Ports and Other Industries [M]. 4th edition. UK: Interpave, 2007.
- [9] Leigh Wardle, Ian Rickards, John Lancaster, et al. Heavy Duty Industrial Pavement Design Guide [M]. MINCAD Systems, 2007.
- [10] 胡洪龙, 谈至明, 袁静波. 港区铺面结构的当量单轮荷载 [J]. 中国港湾建设, 2014, 5:21.
HU Honglong, TAN Zhiming, YUAN Jingbo. Equivalent Single Wheel Load of Pavement Structure in Harbour District [J]. China Harbour Engineering, 2014, 5:21. (in Chinese)

(编辑:徐敏)