

基于地面力学理论的机场缓冲地带设计方法

朱剑飞^{1,2}, 蔡良才¹, 李光元¹, 邵斌¹, 王海服¹, 季正红³, 韩夏冰⁴

(1. 空军工程大学工程学院, 陕西 西安 710038; 2. 中航第三工程总队, 江苏 南京 210000; 3. 南京军区空军机场营房处, 浙江 杭州 310008; 4. 空军第八空防工程处, 四川 成都 610000)

摘要 针对机场缓冲地带的设计, 通过建立飞机机轮-阻机砂堤的力学分析模型, 运用地面力学理论, 采用 Bekker 承压模型和 Janosi 剪切模型, 结合实际应用中机轮所受的水平阻力应符合起落架的设计范围, 推导出阻机砂堤设计公式, 总结了缓冲地带的几何设计要求和设计步骤, 最后通过应用实例验证。验证结果表明: 该方法设计合理可行, 同时可为跑道拦阻材料的力学特性及拦阻材料的开发提供理论依据。

关键词 飞机拦阻; 阻机砂堤; 地面力学; 缓冲地带

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2011.02.004

中图分类号 TU248.6 **文献标识码** A **文章编号** 1009-3516(2011)02-0017-05

为了保证飞机起飞和着陆滑行时冲出跑道的安全, 在机场规划设计时, 在跑道两端必须考虑安全设施, 即设置一定长度的端保险道, 其长度一般在 200-400 m 之间。有些机场, 在端保险道上还修筑飞机拦阻设施, 形成使冲出跑道飞机降低速度的缓冲地带, 进一步地保证飞机安全^[1]。缓冲地带阻机砂堤具有许多优点: 使用范围较广、不受气象条件限制、使用维护工作量小、不影响机场净空条件、再次使用准备时间短、损伤飞机程度轻、功能强、有效使用宽度大。然而, 国内目前对缓冲地带的研究较少。本文基于地面力学理论研究确定缓冲地带阻机砂堤几何尺寸的方法。

1 力学模型

1.1 假设条件

由于飞行员在飞机着陆时操纵不当导致延缓接地或者由于飞机机械故障导致着陆滑跑时刹车装置失灵或阻力伞不能放出或者在起飞滑跑过程中因此而临时决定中断起飞而不能刹车等情况, 跑道长度会不够用而使飞机冲出跑道。飞机初始冲入拦阻砂时, 前、主起落架均压入拦阻砂中, 共同受拦阻砂的拖滞力作用而减速停止^[2]。由于飞机起落架单轮与多轮的计算形式相似, 本文只以单轮形式来计算。相比砂子的刚度, 飞机轮胎可假设为刚性轮胎。

1.2 飞机受力分析

当前、主起落架均压入拦阻砂中时, 根据能量守恒定律, 拦阻砂作用在飞机上的阻力所作的功就是把飞机冲出跑道时的动能和位能消耗掉, 即:

$$E_V = \frac{1}{2}mv_0^2 = F_D L + (G - F_V - F_L)(H \pm h) \quad (1)$$

式中: E_V 为飞机冲入拦阻砂的初始动能; F_V 为拦阻砂作用于机轮的垂直负载; F_D 为拦阻砂作用于机轮的水平拖滞力; m 为飞机质量; v_0 为飞机进入拦阻砂的初始速度; G 为飞机冲出跑道时的重量, $G = mg$, g 为重力加速度; F_L 为升力^[3]; L 为拦停距离; H 为飞机压入拦阻砂内的深度; h 为拦阻砂起点至终点的高差(缓冲地带

* 收稿日期: 2010-10-12

基金项目: 陕西省自然科学基金资助项目(SJ08E210)

作者简介: 朱剑飞(1983-), 男, 福建莆田人, 硕士生, 主要从事机场规划与设计研究. E-mail: 1032861314@QQ.com

一般不出现变坡);拦阻砂顺坡取“-”,逆坡取“+”。

1.3 机轮前进时的力学模型

机轮在松软地面上前进时的运动与力学性能主要取决于由土壤变形引起的滚动阻力以及附着推力^[4-5]。由于剪切作用理论比较精确地反映了土壤的内在特性,本文选用其计算机轮与土壤的接触力。

1.3.1 土的力学特性

土壤的力学特性包括承压特性和剪切特性。地面力学研究时通常都借鉴 Bekker 半径验法;将土壤的变形分解为相互独立的竖直方向的变形和水平方向的变形,对应着土壤的承压特性和剪切特性。

1.3.1.1 土壤的承压特性

根据 Bekker 的承压模型,土壤的正应力有如下关系式

$$\sigma = \left(\frac{k_c}{b} + k_\phi \right) z^n \quad (2)$$

式中: b 为压板的短边长度; z 为压板的下陷量; n 为变形指数; k_c 为土壤内聚力模量; k_ϕ 为土壤摩擦模量。

1.3.1.2 土壤的剪切特性。

根据 Janosi 的塑性土壤剪切理论,土壤的剪应力与土壤的剪切位移成如下关系:

$$\tau = \tau_{\max} \left(1 - e^{-\frac{j}{k}} \right) \quad (3)$$

式中: j 为土壤的剪切位移; k 为土壤的剪切弹性模量; τ_{\max} 为土壤的最大剪应力,由摩尔-库仑屈服准则求出, c 为土壤的内聚力; φ 为土壤的内摩擦角,则有:

$$\tau_{\max} = c + \sigma \tan \varphi \quad (4)$$

1.3.2 机轮的受力分析

通过研究机轮与拦阻砂的接触面模型,可以确定拦阻砂产生的阻力、支持力、砂承载力系数、机轮直径和压入深度的函数关系。

1.3.2.1 阻力分析。

飞机在土质区上滑行时,机轮会受到较大的滚动阻力。当不变形的刚性轮在土质区的表面运动时,刚性轮与土表面的受力情况见图1。图中 P_k 为轮荷载, F 为水平牵引力。轮子压入土中的深度为 h_1 ,可恢复的变形为 h_2 。这样,轮子通过以后,土表面的轮辙深度为 $H = h_1 - h_2$ 。 q_z 为在深度 z 处,土作用在轮缘单位面积上的径向反力。

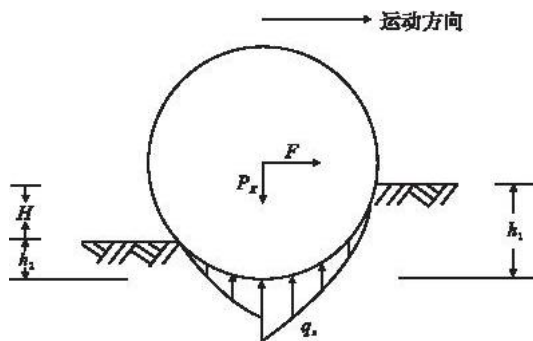


图1 刚性轮轮辙计算图

Fig. 1 The compute diagram of rigid wheel

根据道面设计轮辙理论^[6]可知,气轮胎在砂表面滚动时的滚动摩擦系数和轮辙深度可计算为:

$$f = P_k / \alpha \sigma' B D, \quad H = P_k^2 / \alpha \sigma'^2 B^2 D \quad (5)$$

式中: B 为刚性轮宽度; D 为刚性轮直径; α 为换算系数,其值与轮胎压力及土壤的承载力系数 σ' 有关, σ' 为土的承载力系数,其值等于 $z = 1 \text{ cm}$ 处的土作用在轮缘上的径向反力。

1.3.2.2 剪切力分析

将机轮与土壤接触区域内的任一点应力分解为切线方向应力和法线方向应力,机轮的受力情况见图2。

根据 Janosi 剪应力公式,可以得到机轮的剪切位移为:

$$j = r [(\theta_m - \theta) - (\sin \theta_m - \sin \theta)] \quad (6)$$

根据 Janosi 剪应力-剪切位移公式,可以得出机轮任意一点的剪切应力见式(7),正应力 $\sigma(\theta)$ 可以根据 Bekker 的承压公式求出,见式(8):

$$\tau(\theta) = [c + \sigma(\theta) \tan \varphi] \left(1 - e^{-\frac{j}{k}} \right) \quad (7)$$

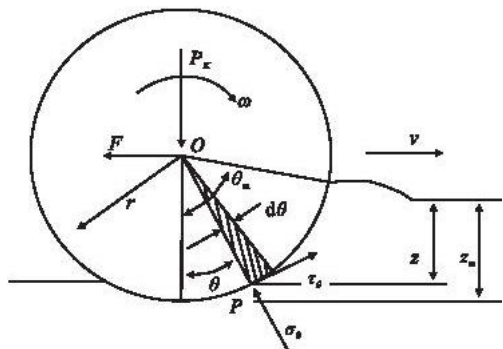


图2 车轮前进受力图

Fig. 2 The load map of plane-wheel

$$\sigma(\theta) = \left(\frac{k_c}{b} + k_\phi \right) [r(\cos\theta - \cos\theta_m)]^n \quad (8)$$

当机轮与土壤作用时,根据图 2 分析出机轮垂直方向和水平方向的受力情况为:

$$P_K = rb \int_0^{\theta_m} (\sigma(\theta) \cos\theta - \tau(\theta) \sin\theta) d\theta \quad (9)$$

$$F' = rb \int_0^{\theta_m} (\tau(\theta) \cos\theta - \sigma(\theta) \sin\theta) d\theta \quad (10)$$

理论和实验研究均表明,土壤条件是影响机轮受力的主要参数之一,特性参数大多可通过试验或测量得到,在理论研究中,一些参数受实验条件所限难以获得,通常根据已知的土壤物理与力学特性参数参照与其相近的其它土壤的参数选定^[7]。

1.4 阻机砂堤计算公式

飞机受到拦阻时可能出现 2 种情况:① 飞机刹车失灵,前起落架和主起落架都处于滚动状态;② 飞机刹车刹死,前起落架处于滚动状态(前起落架一般不带刹车系统),主起落架处于滑动状态。设计阻机砂堤时只按最不利情况考虑,即只考虑第一种情况。此时拦阻砂堤计算公式为:

$$\frac{1}{2}mv_0^2 \leq \sum F_n L_n + (G - F_V - F_L)(H \pm h) \quad (11)$$

式中: F_n 为飞机在拦阻砂堤上所受各段的阻力; L_n 为拦阻砂堤各段长度。

飞机所受的砂堤阻力为:

$$F_n = F' + P_z f_1 + P_F f_2 \quad (12)$$

为计算方便,须将 G 换算成主起落架、前起落架的荷载, P_z 为主起落架上承担的荷载; P_F 为前起落架上承担的荷载。则可得:主轮阻力系数为 $f_1 = \frac{P_z}{2D\sigma'B\alpha}$, $H_1 = \frac{P_z^2}{4\alpha\sigma'^2 B^2 D}$;前轮阻力系数为 $f_2 = \frac{P_F}{D\sigma'B\alpha}$, $H_2 =$

$\frac{P_F^2}{\alpha\sigma'^2 B^2 D}$ 。代入式(11),乘以安全系数 K 可得:

$$\frac{1}{2}mv_0^2 K \leq \sum \left(\frac{P_z^2}{2D\sigma'B\alpha} - 2rb \int_0^{\theta_m} (\tau_1(\theta) \cos\theta - \sigma_1(\theta) \sin\theta) d\theta + \frac{P_F^2}{D\sigma'B\alpha} - rb \int_0^{\theta_m} (\tau_2(\theta) \cos\theta - \sigma_2(\theta) \sin\theta) d\theta \right) L_n + (G - F_V - F_L)(H \pm h) \quad (13)$$

式(13)表明:缓冲地带要有足够的长度和足够小的土壤承载力系数,才可能把飞机冲出跑道时的动能和位能消耗掉。考虑各方面的不利因素,还须乘以安全系数 K (一般采用 $K = 1.25$)^[6]。由于飞机着陆时起落架若承受阻力过大易造成折断,因此 F_D 、 F_n 的取值应当在起落架可以承受的限度内。在实际应用中, F_D 、 F_n 应当参照飞机设计手册的数据来确定。由此可以得到起落架分别可以承受的最大水平拖力 F_C ($F_C \leq F_D$, $F_C \leq F_n$)。土壤承载力系数 σ' 不能太小,否则会把起落架折坏。因此,缓冲地带作用在起落架上的水平力不能太大。飞机作用在主轮上的水平推力的允许值为:

$$T_{\max} \leq nG \quad (14)$$

式中: n 为系数, $n = 0.65$ ^[8]。由于:

$$T_{\max} = P_k f_{\max} + F' = P_k f_n + F' = P_k \frac{P_k}{D\sigma'_{\min} B\alpha} - rb \int_0^{\theta_m} (\tau_1(\theta) \cos\theta - \sigma_1(\theta) \sin\theta) d\theta \quad (15)$$

$$P_k \frac{P_k}{D\sigma'_{\min} B\alpha} - rb \int_0^{\theta_m} (\tau_1(\theta) \cos\theta - \sigma_1(\theta) \sin\theta) d\theta \leq 0.65G \Rightarrow \sigma'_{\min} \geq \frac{P_k^2}{\left(0.65G + rb \int_0^{\theta_m} (\tau_1(\theta) \cos\theta - \sigma_1(\theta) \sin\theta) d\theta \right) DB\alpha} \quad (16)$$

同时,缓冲地带的总长度一定要小于跑道端保险道的长度 L ,即: $\sum L_n \leq L$ 。

2 缓冲地带设计步骤

2.1 收集有关资料

在缓冲地带平面布局和平面尺寸确定之前,需要收集该地区的气象条件,如最热月平均气压与日最高气

温的多年平均值,确定该地区的地形图,了解使用的机种及其特性,参考各种相关的标准、规范等。

2.2 确定缓冲地带构型

按照所飞机型,使用单位的使用要求以及场区的地形条件,确定缓冲地带的构型。研究和实践表明,分段设置阻机砂堤效果最好。1、2级机场可同时设置阻机砂堤和拦阻网,见图3;3、4级机场由于所飞飞机质量大、速度快,拦阻网起不到拦阻效果,所以只设置阻机砂堤,见图4。

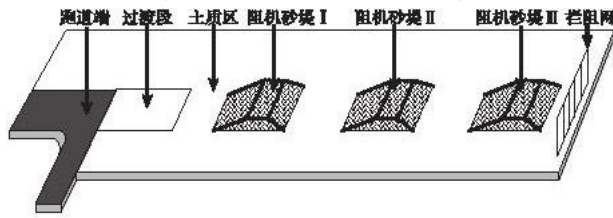


图3 1、2级机场缓冲地带示意图

Fig. 3 First-degree and second-degree airport buffering zone sketch map

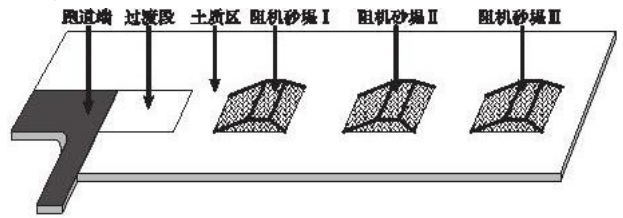


图4 3、4级机场缓冲地带示意图

Fig. 4 Third-degree and fourth-degree airport buffering zone sketch map

2.3 确定缓冲地带总长度

按所飞机型和所用跑道长度,根据使用机场的实际地形情况,计算出该机型冲出跑道的距离和概率,确定端保险道总长度。如果条件允许可适当加长端保险道长度;如果总长度过小,可适当增加阻机砂堤厚度。

2.4 阻机砂堤材料参数及几何尺寸计算

阻机砂为一种各向异性材料,诸如含水量、松散密度等因素都将影响其力学特性^[9]。湿砂的静强度较干砂的高,动载抗切强度却较低。考虑到飞机-砂的相互作用中,机轮对砂的加载速率与飞机的直线运动速度成正比,一般属于快速加载的范畴,故而降低砂的含水量,将有利于提高阻力。砂土颗粒排列的疏密程度直接影响着砂的抗切强度。为提高砂堤的阻力,宜选择松散密度大些的砂土。

根据不同机型、质量、冲出速度,用式(13)计算出阻机砂堤的长度;阻机砂堤宽度与使用跑道宽度相同,也可适当增加^[10];阻机砂堤高度(厚度)初步选取应不超过所飞机型的机轮直径,如果起落架受到的冲击力过大,应通过计算逐步降低阻机砂堤高度;当机轮处于自由滚动状态时,阻机砂堤的间距大小对阻机效果影响不大,所以应根据实际缓冲地带长度来确定间距。

3 实例验证

3.1 实验数据

对某机场缓冲地带进行设计。该机场跑道长2.4 km,宽50 m,缓冲地带原有长度为300 m,供某型飞机使用。飞机总质量 8.655×10^3 kg;机轮尺寸: $B=0.16$ m, $D=0.66$ m;冲出跑道速度 $V_0=20$ m/s。

3.2 初步设计方案

选取的砂子为干砂,含水量为0, $n=1$, $k_c=0.95$ kN/mⁿ⁺¹, $k_\phi=1528.43$ kN/mⁿ⁺², $c=1.04$ kPa, $\phi=28^\circ$, $E=64.74$ MPa, $G=24.9$ MPa, $\mu=0.3$, $\sigma'=0.4$ MPa;缓冲地带的坡度 $i=0$;阻机砂堤为自然堆积状,横向宽度与跑道同宽。

3.3 数据计算

初步假设阻机砂堤高度与轮子同高,即为0.66 m。计算可得,主轮: $f_1=0.8$, $H_1=0.47$ m;前轮: $f_2=0.2$, $H_2=0.03$ m。由于缓冲地带坡度为零,所以可忽略 $(G-F_V-F_L)(H \pm h)$ 的值。由式(13),可得出 $L_n \geq 18.11$ m,且 $T_{\max} \leq nG$ 。则可设置阻机砂堤为4道,顶宽为5 m,横向宽度为跑道宽度,侧坡为自然堆积坡度,阻机砂堤之间的中心间距为10 m,第一道阻机砂堤距跑道端距离为60 m,同时在250 m处设置拦阻网。

在一次飞行事故中该机场飞机以23 m/s左右的速度冲出跑道进入0.5 m高的阻机砂堤,滑行21 m后停下。这与计算得出的18.11 m基本相近,说明设计方案可行。

4 结束语

针对当前机场缓冲地带的设计研究,提出一种基于地面力学理论机场跑道缓冲地带设计方法,即采用基

于地面力学中的 Bekker 承压模型和 Janosi 剪切模型,建立了一种飞机机轮在砂堤上前进时的力学模型,给出机场缓冲地带设计方法和设计步骤。最后,通过实例分析,针对某种机型和特定阻机砂材料应用地面力学理论计算出阻机砂堤的长度,确定出阻机砂堤的尺寸。计算出的结果基本上与实际情况相符合,且比以往设计更合理。

参考文献:

- [1] 蔡良才. 机场规划设计[M]. 北京: 解放军出版社, 2002.
CAI Liangcai. The planning and design of airdrome[M]. Beijing: People's liberation army press, 2002. (in Chinese)
- [2] 常虹. 新型飞机道面拦阻系统应用研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2009.
CHANG Hong. Application and research on engineering material runway arresting system[D]. Tianjin: Civil aviation university of china, 2009. (in Chinese)
- [3] 李光元. 飞机在双面横坡跑道上的航向稳定性[J]. 交通运输工程学报, 2002, 2(3): 112 - 114.
LI Guangyuan. Directional stability of aircraft running on runway with two transverse slopes[J]. Journal of traffic and transportation engineering, 2002, 2(3): 112 - 114. (in Chinese)
- [4] 庄继德. 计算汽车地面力学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2001.
ZHUANG Jide. Computational vehicle terramechanics[M]. Beijing: China machine press, 2001. (in Chinese)
- [5] 王林. 月球车车轮与土壤作用的力学特性分析与测试系统设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.
WANG Lin. Mechanical analysis of wheel - soil Interaction for lunar rover and design a test - bed[D]. Harbin: Harbin institute of technology, 2006. (in Chinese)
- [6] 翁兴中, 蔡良才. 机场道面设计[M]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
WENG Xingzhong, CAI Liangcai. The research on the airport ground[M]. Beijing: China communications press, 2007. (in Chinese)
- [7] HDM. Soft - ground arresting system for airport :finalrept[R]. 1993N94 - 262021/9/HDM.
- [8] 丁德亮, 郑汝海, 邵斌, 等. 机场缓冲地带设计研究[J]. 四川建筑科学研究, 2008, 34(5): 192 - 194.
DING Deliang, ZHENG Ruhai, SHAO Bin, et al. Study on designing buffering zone of airdrome[J]. Sichuan building science, 2008, 34(5): 192 - 194. (in Chinese)
- [9] Tyler Halsey. Sensitivity analysis of cementations engineered material arresting system[D]. Arkansas: University of arkansas, 2008.
- [10] 邵斌, 蔡良才. 飞机对跑道及其道肩宽度要求的分析[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2002, 3(2): 16 - 19.
SHAO Bin, CAI Liangcai. Analysis of airplane's demand for runway and its shoulder's width[J]. Journal of air force engineering university: natural science edition, 2002, 3(2): 16 - 19. (in Chinese)

(编辑: 徐敏)

Research on Designing Buffering Zone of Airdrome Based on Terramechanics Theory

ZHU Jian - fei^{1,2}, CAI Liang - cai¹, LI Guang - yuan¹, SHAO Bin¹, WANG Hai - fu¹, JI Zheng - hong³, HAN Xia - bing⁴

(1. Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China; 2. NO.3 Unit of China Airport construction, Nanjing 210000, China; 3. Hangzhou Real Estate Management Department, Air Force of Nanjing Military Area Command, Hangzhou 310008, China; 4. The Eighth Air Defense Engineering Department of Air Force, Chengdu 610000, China)

Abstract: Sometimes planes may dash out of runway when taking off and landing. In order to ensure the safety of the planes, we should take care of safety precautions in planning and design of airdrome. In this paper, a mathematical model of the plane - wheel and arresting system of sand is built. Through this model, in combination with terramechanics theory and the practical factor that the drag load of wheels should conform to the design range of undercarriages, the paper has discussed the buffering zone in detail in designing formula and approach. Also the geometric design requirement and design steps of the buffering zone are summarized, and the feasibility of the designing method is verified by living examples, which provide a theoretic foundation on the mechanics performance and independent development for the further research on soft - ground arresting system.

Key words: runway arresting system; arresting system of sand; terramechanics; buffering zone