

文章编号:1674-8190(2013)03-306-06

飞机刹车系统方案设计及仿真分析

陶周亮¹, 聂宏^{1,2}, 魏小辉^{1,2}, 刘向尧¹, 尹乔之¹

(1. 南京航空航天大学 机械结构力学及控制国家重点实验室, 南京 210016)

(2. 南京航空航天大学 飞行器先进设计技术国防重点学科实验室, 南京 210016)

摘要: 构建飞机刹车系统方案设计环境, 以提高飞机刹车系统方案设计阶段的设计效率和质量。研究刹车装置参数和防滑控制系统参数的快速确定方法, 通过迭代的设计思想使结果符合设计要求; 估算刹车装置性能和刹车系统的动态特性。在 MATLAB/Simulink 中建立刹车系统模型, 通过 MATLAB 引擎调用的方式进行刹车系统的动力学分析; 以某无人机刹车系统为设计实例进行其刹车系统的方案设计, 动力学仿真中刹车系统工作良好, 与实际工作状态基本吻合。结果表明: 本文提供的飞机刹车方案设计方法快速有效。

关键词: 刹车系统; 方案设计; 性能估算; 仿真分析; 软件开发

中图分类号: V226

文献标识码: A

Scheme Design and Simulation Analysis of Aircraft Brake System

Tao Zhouliang¹, Nie Hong^{1,2}, Wei Xiaohui^{1,2}, Liu Xiangyao¹, Yin Qiaozhi¹

(1. State Key Laboratory of Mechanics and Control of Mechanical Structures, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

(2. Key Laboratory of Fundamental Science for National Defense-advanced Design Technology of Flight Vehicle, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: The aircraft brake system design environment is built to improve the scheme design efficiency and quality of aircraft brake. First, the brake system is designed according to the basic parameters of aircraft. According to the parameters of brake device and anti-skid control system, the performance is estimated. Then, the model of brake system is built in MATLAB/Simulink and by using of MATLAB engine the dynamic analysis of the brake system is done. Finally, the design and dynamic simulation of an UAV brake system are accomplished as an example, and both of them coincide well with the actual working condition. Results show that the method of aircraft brake design presented in this paper is rapid and effective.

Key words: brake system; scheme design; performance estimation; simulation analysis; software development

0 引言

刹车系统是飞机起降系统的组成部分, 在飞机起飞、安全着陆中起着重要作用。刹车系统设计是以飞机的基本参数为基础进行的, 若飞机参数发生

变更, 则刹车系统就需要重新设计, 传统的设计方法要耗费大量的人力和时间。

针对刹车系统的设计问题, 美国 Goodrich 公司提出了刹车装置基本参数的估算方法^[1]; 英国 H. G. Conway^[1]提出了刹车装置重量的估算方法。国内, 李洪果等^[2]研究了全电刹车系统的设计; 徐冬苓等^[3]、王纪森等^[4]对刹车系统建模及仿真做了比较细致地研究, 但是对刹车系统的设计方法尚缺乏研究。随着飞机越来越大型化和复杂化, 刹车系统的设计也趋于繁杂, 刹车系统的计算机辅助设计方法是必然的研究趋势。本文试图将工程算法、数

收稿日期: 2013-04-10; 修回日期: 2013-05-08

基金项目: 国家自然科学基金(51075203)

江苏高校优势学科建设工程资助项目

通信作者: 聂宏, hnie@nuaa.edu.cn

数据库技术和数学迭代方法结合起来以研究快速设计方法,开发一套刹车系统方案设计软件,缩短飞机起落架刹车系统的研制周期并提高刹车系统的设计质量。

1 刹车系统方案设计思路

刹车系统方案设计总体上可以分为刹车装置设计、防滑刹车系统设计和动力学仿真分析三部分。软件基于 VC++6.0^[5] 开发,包含三大模块,前两个模块中都包含了参数计算和性能计算,囊括了三种刹车装置和三种防滑刹车系统的设计,动力学仿真分析依靠调用 MATLAB 引擎计算完成,计算流程如图 1 所示。首先通过输入飞机基本参数,如飞机着陆重量、着陆速度和刹车机轮数等估算飞机的刹车能量和停机载荷;根据停机载荷,通过微软提供的 ADO 接口,访问 oracle 9i^[6] 中存储的轮胎及机轮参数数据库并进行选择,然后根据选择的刹车装置类型进一步完成刹车装置设计。根据选择的刹车系统类型,完成刹车系统的基础设计,其中还包括一些关键构件参数的计算、确定防滑控制类型并计算其性能,软件中在计算性能之后要检查是否满足设计要求,如果不满足则要回到前面重新设计,迭代直到满足为止。利用得到的设计结果,输入到 MATLAB 中的 Simulink 模型中,通过 MATLAB 提供的引擎调用接口进行动力学仿真分析。

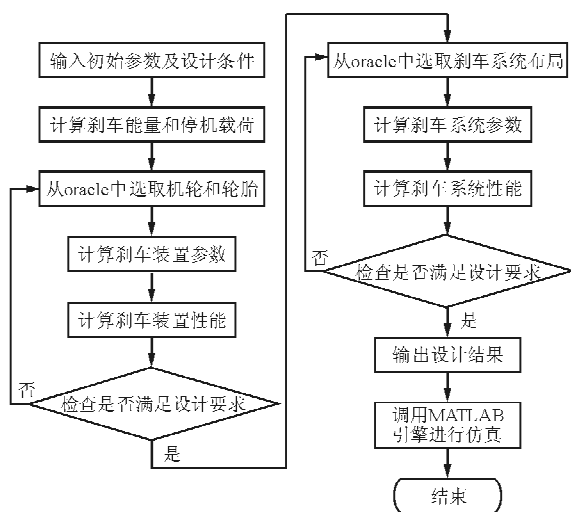


图 1 软件计算流程图

Fig. 1 Flow chart of software calculation

2 刹车系统设计理论

对刹车装置进行设计,首先需计算刹车装置要吸收的能量,其跟飞机重量、起落架布局形式、着陆速度以及带刹车的机轮数量有关。中国国家军用标准 GJB1184 和中国航空工业标准 HB6550 提供了相关的计算方法^[1]。

2.1 刹车装置尺寸计算

一般来说,刹车装置的重量会随着刹车能量的增大而增大,通过统计单位重量刹车能量值可以对刹车装置重量进行估算。而通过已给出的飞机着陆重量、飞机重心到前起落架的距离和飞机重心到主起落架的距离,可以计算得到轮胎的停机载荷,从数据库中选择适当的轮胎和机轮。对于盘式刹车,美国 Goodrich 公司推荐的方法为参照刹车组件重量与刹车能量、刹车片容积与刹车组件重量和轮胎结合径与刹车片直径等的曲线图来确定基本尺寸参数,《航空机轮设计指南》也提供了相关的尺寸估算方法。

对于盘式刹车装置来说,为了增加刹车力矩,动盘和静盘交错排列,因此产生的刹车力矩与摩擦面的对偶个数有关,对刹车力矩进行推导^[7],得出式(1),由式(1)可计算得到刹车盘的数量。

$$M = \int_{R_1}^{R_2} \mu 2\pi r^2 p_b N dr = \frac{2}{3} \mu N \pi p_b (R_2^3 - R_1^3) \quad (1)$$

式中: μ 为刹车盘的摩擦系数; p_b 为刹车压力; N 为摩擦面的对偶个数; R_1 为刹车盘内径; R_2 为刹车盘外径。

2.2 静刹车力矩计算

在起飞线上,当发动机在起飞推力下能刹住飞机不动的刹车力矩称为静刹车力矩,仅主轮刹车时,有

$$M_{b,s,m} = \frac{1}{n_m} \left[T_e - \mu_{rol} \left(\frac{a}{a+b} W_{TO} g + \frac{H + H_T}{a+b} T_e \right) \right] \cdot R_{rol,m} \quad (2)$$

式中: n_m 为刹车主轮个数; μ_{rol} 为机轮地面滚动摩擦系数; T_e 为发动机推力; H 为中心高度; H_T 为推力到中心垂直高度; a 和 b 分别为主起落架到重心的水平距离和前起落架到重心的水平距离;

$R_{rol,m}$ 为滚动半径; W_{T0} 为飞机起飞重量。

2.3 刹车体容温度计算

飞机刹车组件一般由铁基片、碳盘和钢骨架组成,因为它们的比热不相同,所以在计算体容温度时必须考虑不同材料的重量。体容温度可以按式(3)估算

$$t_b = t_o + \frac{KA}{\sum_{i=1}^n m_i c_i} \quad (3)$$

式中: t_b 为刹车装置体容温度; t_o 为环境温度; K 为经验系数; A 为不同刹车状态下的刹车能量; m_i 为组成热库不同材料的重量; c_i 为组成热库不同材料的比热。材料的比热还跟温度有关,故用到了迭代求解。

2.4 刹车距离计算

在计算刹车距离时,可近似不考虑发动机推力及气动力,一般前轮不刹车而主轮刹车,所以存在主轮卸载问题,考虑刹车效率,有

$$S = \frac{V^2(\mu_s H + a + b)}{2\eta g \mu_s b} \quad (4)$$

式中: η 为刹车效率; V 为飞机主轮接地速度; μ_s 为机轮地面静摩擦系数。

2.5 防滑控制系统基础参数计算

刹车系统主要分为液压刹车系统和全电刹车系统,二者唯一的不同之处在于全电刹车系统采用电作动机构取代集中式的液压系统。本节以全电刹车系统为例,该系统一般采用四电机四滚珠丝杠作动机构布局,电机选用重量轻、体积小的稀土永磁无刷直流电机,每个电机通过谐波减速器、伞齿轮等传动装置控制一个滚珠丝杠作动器。

在确定滚珠丝杠送进时的转速和传动比之后,可以进行滚珠丝杠的选取。首先要计算单根滚珠丝杠的平均载荷 F_p ,据此可以确定丝杠的动载荷。

$$C_m = K \cdot F_p \quad (5)$$

式中: $K = K_h K_F K_H q$, K_h 为寿命系数; K_F 为载荷系数; K_H 为硬度系数; q 为工作行程系数。

选用适当的滚珠丝杠来满足动载荷要求,计算滚珠丝杠的传动效率、驱动力矩和传动所需功率,根据齿轮的传动效率和传动比计算折算到电机上的负载转矩和功率,选取适当的无刷直流电机。

2.6 刹车系统快速性计算

全电刹车系统具有良好的快速性和稳定性,本节主要介绍液压刹车系统的快速性。液压刹车系统的快速性计算主要包括两部分:刹车时间和松刹时间。刹车时间也主要包括两部分:充填动态容积至压力 p' ,所需时间和由 p' 增加到 p_{max} 所需时间, p' 是当刹车装置摩擦面之间的间隙完全消除时移动刹车装置活动零件所必需的压力。

刹车第一阶段:压力达到 p' ,时充填时间的确定。

$$\Delta t_1 = V_d / Q_1 \quad (6)$$

式中: V_d 为最大动态容积; Q_1 为平均流量。

$$Q_1 = Af \sqrt{\Delta p} \quad (7)$$

式中: A 为折算的流量系数; f 为节流阀流通截面积; Δp 为压差。

刹车第二阶段:压力由 p' 增加至 p'' ,所需时间。

$$\Delta t_2 = K_0(p'' - p') / Q_2 \quad (8)$$

$$K_0 = f_p L [d / (\delta E) + 1 / E_1] + V_w / E_1 \quad (9)$$

式中: K_0 为系统弹性系数; f_p 为导管的流通截面; L 为导管长度; d 为导管直径; δ 为导管壁厚; E 为导管材料的弹性模量; E_1 为工作液体的弹性模量; V_w 为导管和刹车装置总的静态容积。

Δt_3 为 p'' 到 p''' ,所用时间,依次类推,用同样的方法计算出 $\Delta t_3, \dots, \Delta t_n$ 。

松刹时间也分为两个阶段,分别对应刹车时间的第二和第一阶段,确定的方法类似。

2.7 刹车系统稳定性计算

为了进行液压刹车系统动态计算,需得到由对象方程和调节器方程^[8]组成的系统方程,再进一步得到系统的特征方程

$$k_s T^2 \lambda^3 + k_s T_1 \lambda^2 + k_s \lambda + k = 0 \quad (10)$$

式中: $k_s = C_c / k_1$, C_c 为系统弹性系数; T 和 T_1 为时间常数; k 为阀的行程特性值。根据劳斯判据即可对系统进行稳定性计算。

2.8 刹车的动力学仿真

在MATLAB中建立刹车系统模型,其中包含六个子模型的建立:机身模型、起落架缓冲系统模型、起落架航向上的刚度模型、刹车机轮模型、飞机

着陆滑跑跑道模型和飞机液压伺服刹车模型^[9-10] LAB/Simulink 建立。
(全电刹车),其计算模型如图 2 所示,采用 MAT-

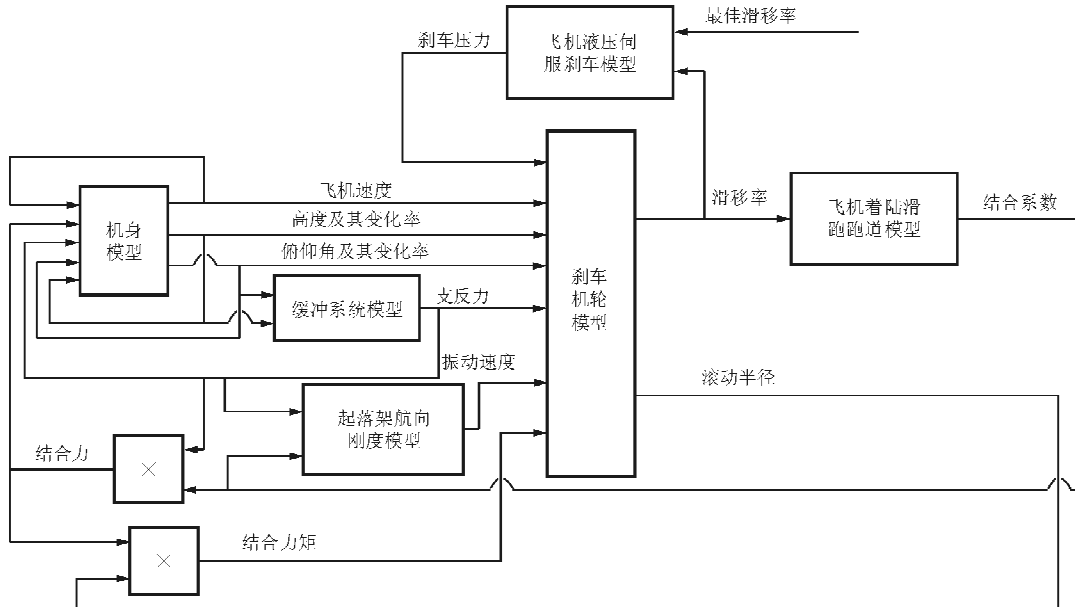


图 2 刹车系统仿真计算模型

Fig. 2 Model of brake system simulation

飞机机身模型简化为航向、俯仰和竖直三个运动方向上的刚体模型,根据动量定理及动量矩定理即可得到机身模型。

缓冲系统模型可以简化为单质量阻尼弹簧振动数学模型

$$\begin{cases} N_1 = K_{x1} Y_1 + C_1 \dot{Y}_1 \\ N_2 = K_{x2} Y_2 + C_2 \dot{Y}_2 \end{cases} \quad (11)$$

起落架与飞机机体之间为非刚性连接,因此起落架在刹车过程合纵会产生水平位移和角位移,起落架航向刚度模型的数学表达式为

$$\left[\frac{1}{K_0} / \left(\frac{1}{\omega_n^2} s^2 + \frac{2K_m}{\omega_n} s + 1 \right) \right] f_1 = -da \quad (12)$$

$$dV = \frac{d}{dt}(-da) \quad (13)$$

式中:da 为航向振动位移;dV 为航向振动速度;K₀ 为动态刚度系数;K_m 为阻尼比;f₁ 为地面结合力;ω_n 为固有频率。

跑道模型采用 Pacejka 轮胎模型即可得到

$$\begin{cases} \text{干跑道: } \mu_x = 0.8 \sin[1.533 4 \tan^{-1}(14.032 6\sigma)] \\ \text{湿跑道: } \mu_x = 0.4 \sin[2.019 2 \tan^{-1}(8.209 8\sigma)] \\ \text{冰跑道: } \mu_x = 0.2 \sin[2.087 5 \tan^{-1}(7.201 788\sigma)] \end{cases} \quad (14)$$

对刹车机轮中心使用转动惯量定律,得到滚动线速度

$$\dot{w} = (M_f - M_b) / I \quad (15)$$

式中:M_f 为结合力矩;M_b 为刹车力矩;I 为机轮转动惯量。

在 VC++ 环境下,通过调用 MATLAB 提供的引擎接口^[11]进行动力学仿真,这部分组成了软件的仿真分析子模块。

3 设计实例

以某无人机为例,其基本参数如表 1 所示。该无人机采用盘式刹车结构、全电刹车系统以及基于滑移率的防滑控制。

表 1 某无人机的基本参数

Table 1 Basic parameters of one unmanned aerial vehicle

基本参数	数值
着陆速度/(km · h ⁻¹)	100
重心高度/mm	895.6
刹车主轮数/个	2
最大着陆重量/kg	260
前轮到重心的距离/mm	1720.35
主轮到重心的距离/mm	372.65

首先计算得到主轮受载为 1 198.78 N, 由此选定主轮胎规格为 300 mm×130 mm-102 mm; 由轮胎结合径 102 mm 估算得到刹车盘内外径分别为 52 mm 和 74 mm。

由 GJB1184 估算单轮刹车能量为 47 840 J, 选用碳刹车结构可得到单轮刹车装置重量为 2.7 kg, 刹车盘容积为 476.073 cm³, 进一步估算得到刹车盘总宽为 21.768 cm, 据此可以确定动静盘数量分别为 3 个和 4 个。

部分设计参数如表 2 所示, 其中刹车距离和体容温度根据设计理论估算得到。

表 2 部分设计参数
Table 2 Part of design parameters

输出参数	数值
刹车距离/m	96.22
体容温度/℃	124.699
设计刹车力矩/(N·m)	69.23
滚珠丝杠导程/mm	4
丝杠驱动力矩/(N·m)	0.756
直流电机功率/W	10.26
静刹车活塞推力/N	549.4
滚珠丝杠螺旋角	3°39'
滚珠丝杠公称直径/mm	20
直流电机负载转矩/(N·m)	0.112

防滑刹车采用四电机四滚珠丝杠, 由刹车盘尺寸和设计刹车力矩估算静刹车活塞推力, 据此选取适当的滚珠丝杠和电机。

将飞机的基本参数和刹车装置的基本参数输入到刹车系统动力学仿真模型中进行仿真分析, 动力学仿真结果的滑移率曲线如图 3 所示, 机轮的角速度曲线如图 4 所示。

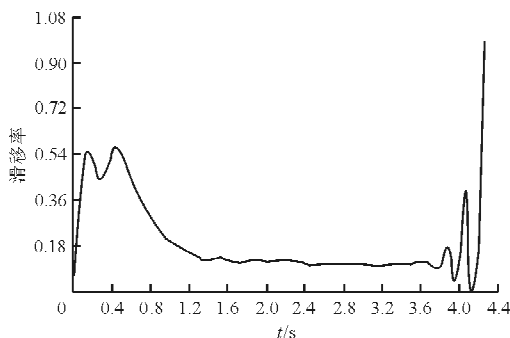


图 3 滑移率曲线

Fig. 3 Slip rate of wheel

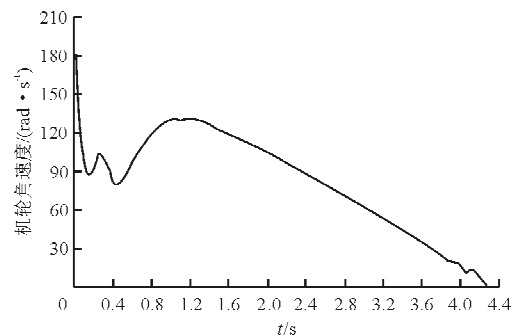


图 4 角速度曲线

Fig. 4 Rotational velocity of wheel

从图 3 可以看出, 仿真总时间为 4.27 s, 前部分滑移率变化很剧烈, 然后快速地朝最佳滑移率 0.12 逼近, 结束前由于低速打滑, 造成曲线激烈震荡。从图 4 可以看出, 仿真假设飞机机轮开始处于纯滚动状态, 开始的刹车力矩偏大, 导致角速度减小很剧烈, 滑移率偏大, 然后在 PID 控制^[12]的作用下刹车力矩开始减小, 角速度回升, 角速度开始平稳下降至机轮停止转动。从仿真结果来看, 刹车系统工作良好。

4 结 论

本文以计算机辅助设计方法为手段, 在传统的刹车系统方案设计方法基础上提出了一种新的设计思路, 搭建飞机刹车系统方案设计环境, 快速地对飞机刹车系统进行方案设计 & 仿真分析, 并以某无人机为设计实例, 设计及仿真结果符合实际, 表明该方法能有效提高飞机刹车系统方案设计阶段的设计效率。

参考文献

- [1] 高泽迎. 飞机设计手册: 第 14 分册[M]. 北京: 航空工业出版社, 2002.
Gao Zejiang. Aircraft design handbook; Section 14 [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2002. (in Chinese)
- [2] 李洪果, 王楷, 吴瑞祥, 等. 飞机全电刹车系统研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2004, 30(4): 339-343.
Li Hongguo, Wang Kai, Wu Ruixiang, et al. Demonstration of an plane electrically actuated brake[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2004, 30(4): 339-343. (in Chinese)
- [3] 徐冬苓, 李玉忍, 谢利理. 飞机防滑刹车系统的建模与仿真研究[J]. 测控技术, 2004, 23(11): 66-68.
Xu Dongling, Li Yuren, Xie Lili. Research on modeling and

- simulation of aircraft anti-skid braking system[J]. Measurement & Control Technology, 2004, 23(11): 66-68. (in Chinese)
- [4] 王纪森, 汤传业, 邓英华, 等. 飞机防滑刹车系统动力学建模及仿真研究[J]. 计算机仿真, 2007, 24(10): 70-73.
Wang Jisen, Tang Chuanye, Deng Yinghua, et al. Dynamics modeling and simulation of aircraft ABS[J]. Computer Simulation, 2007, 24(10): 70-73. (in Chinese)
- [5] 王艳平, 张铮. Windows 程序设计[M]. 第2版. 北京: 人民邮电出版社, 2008.
Wang Yanping, Zhang Zheng. Programming Windows second edition[M]. Second Edition. Beijing: Posts and Telecom Press, 2008. (in Chinese)
- [6] 莫顿. Oracle SQL 高级编程[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2011.
Karen Morton. Oracle SQL advanced programming[M]. Beijing: Posts and Telecom Press, 2011. (in Chinese)
- [7] Currey N S. Aircraft landing gear design: principles and practices[M]. Washington: AIAA Education Series, 1988.
- [8] 何永乐. 飞机刹车系统设计[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2007.
He Yongle. Aircraft brake system design[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2007. (in Chinese)
- [9] 廖俊侠. 飞机全电刹车系统性能研究与仿真分析[D]. 南京: 南京航空航天大学航空宇航学院, 2009.
Liao Junxia. Aircraft electric brake system performance analysis and simulation[D]. Nanjing: College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2009. (in Chinese)
- [10] 张明. 飞机地面动力学若干关键技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学航空宇航学院, 2009.
Zhang Ming. Research on some key technologies of aircraft ground dynamics[D]. Nanjing: College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2009. (in Chinese)
- [11] 郭虹, 薄云飞, 林冬. VC++与MATLAB混合编程技术研究[J]. 计算机工程, 2002, 28(9): 269-271.
Guo Hong, Bo Yunfei, Lin Dong. Research on multi-language programming technology of VC++ with matlab[J]. Computer Engineering, 2002, 28(9): 269-271. (in Chinese)
- [12] 刘金琨. 先进PID控制MATLAB仿真[M]. 北京: 电子工业出版社, 2012.
Liu Jinkun. Advanced PID control and MATLAB simulation[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2012. (in Chinese)

作者简介:

陶周亮(1989—),男,硕士研究生。主要研究方向:起落架数字化工程。

聂宏(1960—),男,教授,博导。主要研究方向:飞行器起落架设计与分析、飞行器结构抗疲劳设计与分析、飞行器结构与系统CAD/CAE。

魏小辉(1978—),男,博士,副教授。主要研究方向:飞机起落架装置设计、飞机起落架自适应控制技术。

刘向尧(1984—),男,博士研究生。主要研究方向:高品质缓冲器设计、起落架数字化工程。

尹乔之(1990—),女,博士研究生。主要研究方向:非线性动力学与控制。

(编辑:马文静)