文章编号：CSTAM2012-E01-0144

高速列车裙板颤振数值模拟

段虎平[1]，*徐永君[2]，贾光辉[1]

(1. 北京航空航天大学宇航学院，北京 100191；2. 中国科学院力学研究所水动力学与海洋工程重点实验室，北京 100190)

摘　要：应用有限元分析软件 MSC.Patran 建立了简化的裙板有限元模型,并利用 MSC.Patran 对其进行了颤振分析。通过对计算结果的对比分析，得到结构参数对裙板颤振特性的影响规律。研究结果为今后高速列车裙板的设计提供了一些参考。

关键词：颤振；裙板；MSC.Nastran/Patran；仿真

NUMERICAL SIMULATION OF THE FLUTTER FOR SKIRT PLATE OF HIGH-SPEED TRAIN

DUAN Hu-ping[1] , *XU Yong-jun[2] , JIA Guang-hui[1]

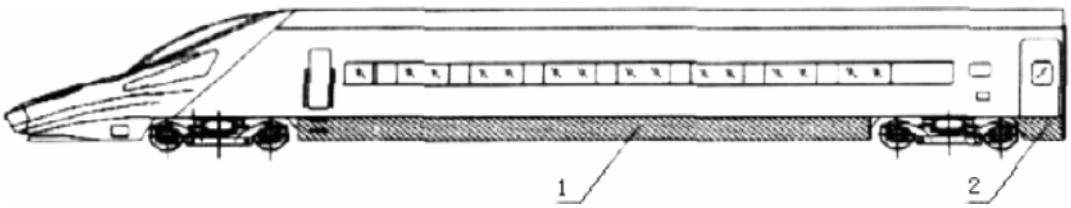
(1.School of Astronautics, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China;

2.Key Laboratory for Hydrodynamics and Ocean Engineer, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Science, Beijing 100190, China)

Abstract: In this paper, the finite element model of simplified skirt plate for high-speed train was built by the finite element analysis software MSC.Patran, and their flutter analysis are carried out with MSC.Patran. Through the contrast analysis of results of numerical simulation, the laws of the influence from the structure parameter to flutter characteristics of skirt plate were obtained. The research results provide some references for the future design of skirt plate for high-speed train.

Key words: flutter; skirt plate; MSC.Nastran/Patran; simulation

随着列车车速的日益提高，列车与空气的相互作用变得十分强烈，可能导致列车裙板发生颤振。裙板，通常设在车轮位置，以抵挡住车轮噪声向外辐射。铁道部规定：200km/h 速度级以上的车体都必须安装裙板。裙板可以使车下空间与外界大部分隔开，有利于减小空气阻力。高速动车组裙板按照车下吊装设备的安装位置分为底架中央裙板和通过台下部裙板两大模块(图 1)[1][4]，本文研究底架中央裙板。



1. 底架中央裙板；2. 通过台下部裙板

图 1　裙板布置示意图

裙板是一个略有弯曲的薄壳结构，其尺寸比较大，在高速气流作用下容易发生颤振。目前国内外对高速列车裙板的颤振问题研究很少。由于裙板的弯曲度很小，本文分别简化为平板(见图 3)和折板(见图 8-10)

作者简介：* 徐永君(1964－)，男，河北人，副研究员，博士，主要从事工程力学研究(E-mail:yjxu@imech.ac.cn)；
段虎平(1986－)，男，陕西人，硕士研究生，主要从事结构颤振研究；
贾光辉(1965－)，男，山西人，副教授，博士后，主要从事结构动力学研究。

© 1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

来进行研究。

本文采用软件 MSC.Nastran/Patran 来对裙板进行颤振研究，为了说明本文数值模拟方法的可靠性，本文用此方法对文献[3]中平板机翼模型(见图 2)的颤振试验进行了数值模拟。本文随机选取了文献[3]中的两组试验进行模拟：试验 1 中，模型的半展长 B 为 0.49m，马赫数为 0.32；试验 2 中，模型的半展长 B 为 0.70m，马赫数为 0.23。其他未知参数可查阅文献[3]。模拟结果和试验结果如表格 1 中所示。从表 1 中可以看出，模拟结果和文献[3]中的试验值很接近。本文将裙板主要简化为平板和折板进行研究，文献[3]中的机翼都是梯形平板结构，它们的颤振机理相同[2]，结构形状和大小不同。

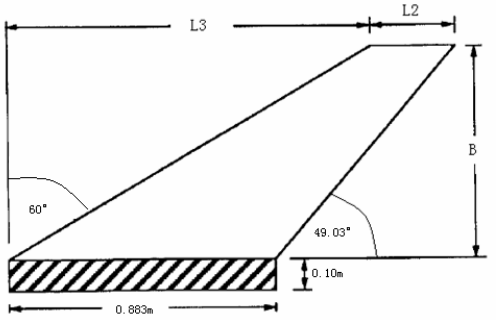


图 2　机翼模型的几何平面图

表 1　颤振特性对比

试验 / 结果	试验 1		
	试验值	本文仿真值	偏差比/(%)
颤振速度/m/s	109.1	107.1	-1.8
颤振频率/Hz	19.4	19.9	2.5
试验 / 结果	试验 2		
	实验值	本文仿真值	偏差比/(%)
颤振速度/m/s	78.3	77.8	-0.6

1　裙板平板模型建立及结果分析

1.1　裙板平板模型建立

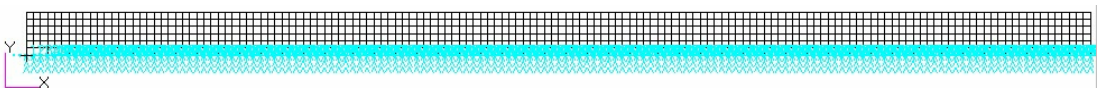


图 3　裙板的平板有限元模型

裙板的平板有限元模型如图 3 所示，板长 15m，板宽和板厚为可变的结构参数。材料为铝合金，其密度为 2700kg/m^3，泊松比为 0.33，弹性模量为 7×10^{10}Pa。如图 3 所示，单边固支。气流方向为 x 轴的正方向。裙板内侧气流流速很小，故假设只有裙板的一侧受到气流作用，取马赫数为 0.45。

1.2　结果与分析

应用软件 MSC.Nastran/Patran 对不同厚度和宽度的裙板进行模态分析[5]，然后，从模态分析结果中提取有关数据，改写颤振程序。将改写好的程序调入到软件 MSC.Nastran 中进行计算，最后得出不同厚度和宽度裙板的颤振速度和颤振频率。当板宽为 0.6m 时，不同厚度下裙板的颤振分析结果如表 2 所示；当板厚为 1mm 时，不同宽度下裙板的颤振分析结果如表 3 所示。图 4 是颤振速度和板厚度的关系曲线图，图 5 是颤振频率和板厚度的关系曲线图。图 6 是颤振速度和板宽度的关系曲线图，图 7 是颤振频率和板宽度的关系曲线图。

表 2　不同厚度下裙板的颤振特性

板厚/mm	0.5	1	1.5	2	2.5
颤振速度/m/s	72	149	224	304	380
颤振频率/Hz	1.14	2.34	3.55	4.75	5.96

表 3　不同宽度下裙板的颤振特性

板宽/m	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
颤振速度/m/s	270	193	149	120	104	86	76
颤振频率/Hz	5.32	3.40	2.34	1.71	1.36	1.01	0.80

从图 4,5 中可以看出，随着裙板厚度的增加，其颤振速度和颤振频率也增加，而且近似呈线性关系，这是因为裙板厚度增大导致其自身结构的刚度变大，使裙板不容易发生颤振。从图 6,7 中可以看出，随着

© 1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

裙板宽度的增加，其颤振速度和颤振频率都减小，这是因为板宽变大后，裙板柔度增加，更容易发生颤振。

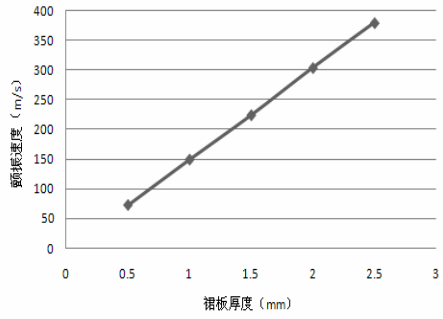


图 4　颤振速度随板厚度的变化曲线

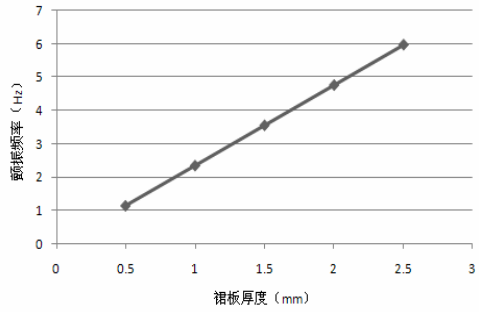


图 5　颤振频率随板厚度的变化曲线

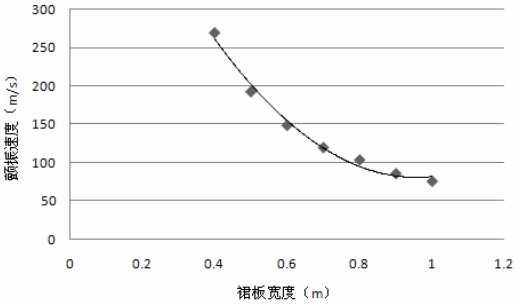


图 6　颤振速度随板宽度的变化曲线

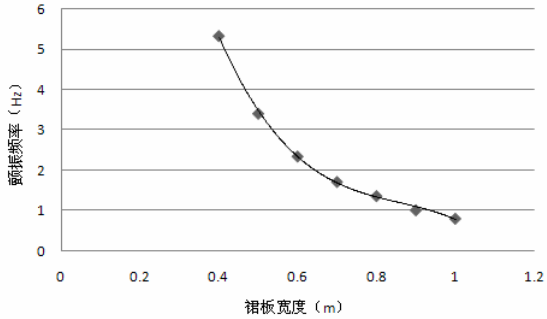


图 7　颤振频率随板宽度的变化曲线

2　裙板折板模型建立及结果分析

裙板是一个略有弯曲的薄板，本文简化为小角度折板进行颤振分析。图 8 是折板的有限元模型示意图，图 9 是折板的侧视图，图 10 是折板的轴测图。如图 9 所示，折板由两块平板组成，长度为 15m，板的厚度取为 1mm，折角 θ 为可变的结构参数。假设气流方向依然为 X 轴的正方向，且只作用于裙板的一面。

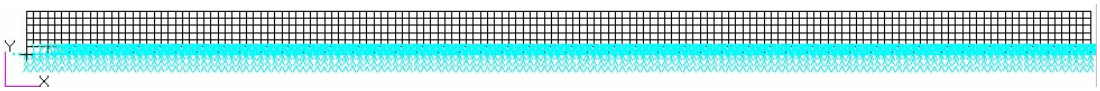


图 8　裙板主视图

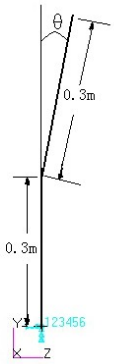


图 9　裙板侧视图

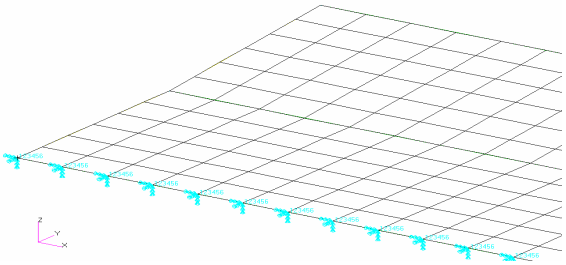


图 10　裙板轴测图

马赫数取为 0.45。两块板的结构网格划分情况都为 250X6，气动网格都为 200X5。同平板情况一样，对不同折角的裙板模型进行模态和颤振分析。最后得到的数值模拟结果如表 4 所示，图 11 是颤振速度和折角 θ

© 1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

的关系曲线图，图 12 是颤振频率和折角 θ 的关系曲线图。从结果可以看出，随着 θ 角的增大，裙板颤振速度和颤振频率都是先增大后减小再增大的趋势，且折角 θ 约为 2°、5° 的时候，颤振速度和颤振频率分别达到极大值和极小值。

表 4　不同 θ 角裙板的颤振特性

θ 角	0°	0.4°	0.6°	0.8	1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	9°	10°	11°
颤振速度/m/s	150	162	173	181	191	206	186	176	173	175	177	182	189	196	202
颤振频率/Hz	2.33	2.92	3.45	3.89	4.10	4.7	4.08	3.79	3.69	3.75	3.76	3.91	4.11	4.39	4.74

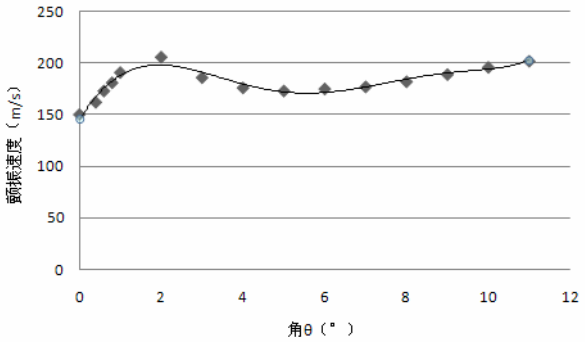


图 11　颤振速度随折角 θ 的变化曲线

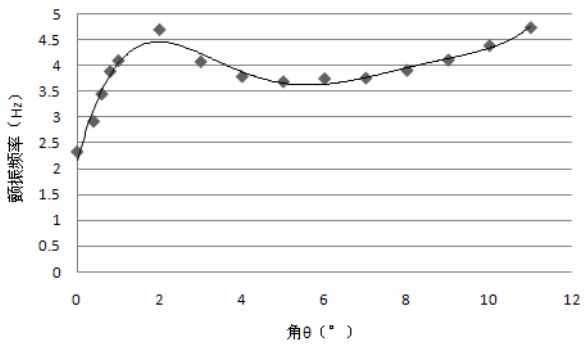


图 12　颤振频率随折角 θ 的变化曲线

3　结语

本文利用有限元软件 MSC.Patran/Nastran,建立了高速列车裙板的简化有限元模型，并对其进行模态分析和颤振分析，对所得到的计算结果进行比较分析，得出如下结论：

(1) 当简化为平板时，颤振速度和颤振频率随着其厚度增大近似线性增加，随着宽度的增大而减小；

(2) 当简化为折板时，颤振速度和颤振频率随着其折角的增大，先增大后减小再增大，且当折角约为 2°、5° 时，裙板颤振速度和颤振速度分别达到极大值和极小值。

参考文献：

[1] 杜秋男,李瑞淳.高速动车组裙板设计研究[J].设计制造第46卷第6期2008年6月

[2] 赵永辉. 气动弹性力学与控制[M].科学出版社.2007

[3] Bryan E.Dansberry,Moses G.Farmer. An Experimental Study of Tip Shape Effects on the Flutter of Aft-Swept, Flat-Plate Wings[R] NASA Technical Memorandum 4180,1990

[4] 杨志刚，陈羽，王毅刚.裙板安装对高速列车气动性能影响的数值分析[J].计算机辅助工程，2010,19(3)：1-4.

[5] 孙长任，杜家政，卢绪智，石可重.MSC.Nastran应用实例教程[M].科学出版社.2005

© 1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net