

# Assessment of Low Speed Wind Tunnel Test Safety Risk Based on Kent Index Method

Hui Wang, Dapeng Gao, Hong Chen

China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang Sichuan  
Email: wanghui105@sina.cn

Received: Dec. 8<sup>th</sup>, 2017; accepted: Dec. 20<sup>th</sup>, 2017; published: Dec. 29<sup>th</sup>, 2017

---

## Abstract

In order to making quantitative analysis for the safety risk of low speed wind tunnel test (LSWTT), considering lack of safety assessment sample of LSWTT, using the reference of the Kent index method application in tunnel safety risk assessment and the operating experience of LSWTT, by means of improving the risk assessment model, working out the assessing principle of risk index and risk acceptability principle, this paper built up the assessment of LSWTT safety risk based on Kent index method, which was used to verify three typical LSWTT project for example. The verification proved that the assessment of LSWTT safety risk based on Kent index method assessed the possibility of the test risk by means of quantitative analysis, and provided the technical support for improving the LSWTT safety control.

## Keywords

Low Speed Wind Tunnel, Security Risk Assessment, Wind Tunnel Test, Kent Index Method

---

# 基于肯特指数法的低速风洞试验安全风险评估

王 辉, 高大鹏, 陈 洪

中国空气动力研究与发展中心, 四川 绵阳  
Email: wanghui105@sina.cn

收稿日期: 2017年12月8日; 录用日期: 2017年12月20日; 发布日期: 2017年12月29日

---

## 摘 要

为定量分析低速风洞试验的安全风险, 针对低速风洞试验安全评估样本量不足的实际, 借鉴肯特指数法在管道风险评估的成功应用, 结合低速风洞试验运行实际, 通过改进风险评价模型、拟定风险指数评分

原则和风险接受准则,建立了以肯特指数法为基础的低速风洞试验安全评估方法,并利用该方法对三个典型低速风洞试验项目进行了实例验证。验证表明,基于肯特指数法的低速风洞试验风险分析方法,能够通过定量分析的办法较好地评价出试验风险发生的可能性,为低速风洞试验安全控制水平的提高提供了技术支撑。

## 关键词

低速风洞, 风险评估, 风洞试验, 肯特指数法

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

空气动力学研究有理论研究、风洞试验和飞行试验三个基本手段。作为其中最为经济、效果最好、应用得最为广泛的风洞试验方法,伴随科学技术的进步,特别是测控技术的发展,在空气动力学研究领域深度和广度的扩展中,愈益发挥其重要的作用[1]。而风洞作为研究先进飞行器空气动力特性不可缺少的最重要试验设备[2],其整个系统涉及到风洞本体、模型/支撑/天平、动力系统、测控系统以及配套的专用试验装置等,系统结构复杂,其运行安全问题一直是关注的重点。为规避风险,在基础建设、能源化工、航空航天以及信息等行业部门均采用风险评估方法来实施风险管理[3]-[10]。目前,广泛应用于过程工业的风险评估方法可分为定性、定量、定性与定量相结合等三大类评估方法,有故障树分析、安全检查表法、层次分析法、因子分析法和概率风险评估法等多种风险评估方法[11][12][13][14][15]。

1992年,美国1992年美国W. Kent Muhlbauer提出了管道风险评分指标体系法[16]。他认为管道事故若按照概率理论进行精确计算时,由于精确计算所需样本量不够,以及计算过程必然采用大量假设,进而导致评价结果的不准确性和不可信。而肯特指数法(如图1)是通过独立分析各管道的影响因素后求取其指数和 $S$  ( $S=T+C+D+O$ );再通过分析管道内物质的危险指数 $M$ 和影响系数 $N$ ,进而求得泄露影响指数 $P$  ( $P=M/N$ );最后计算得到相对风险值 $K$  ( $K=S/P$ , $K$ 越高代表风险值越低,泄露影响系数越小)[16]。该方法在风险打分方法上越过了定量评估中的实际概率打分,且肯特指数法中的指数包含了概率的因素,又不拘泥于确切的概率,具有比较好的说服力[17]。目前该评价方法成功应用于石油运输、桥梁施工和地铁工程和城市建设等方面的安全风险评估[18][19]。

本文针对低速风洞试验中参试设备、人员、模型以及试验类型等多样性导致的获得事故发生时概率精确关系困难的情况,借鉴肯特指数法的思想,建立起以此为基础的低速风洞试验安全评估方法,实现定量分析低速风洞试验安全风险的目的。

## 2. 现有评估方法

### 2.1. 评价原则

采用安全检查表法,通过对参试系统的安全风险进行识别、评价,发现存在的安全弱点,从而选择合适的控制措施、实施安全管理。评估时,采用分级评估方式进行,将风洞试验风险分为技术风险(等级划分为常规、研究性和引导性三级)和安全风险(等级划分为常规、危险性和破坏性三级);采用一票晋级制,即在评级的多项指标中只要有一项指标达到某高风险等级,即判定相关试验风险达到该高风险等级。

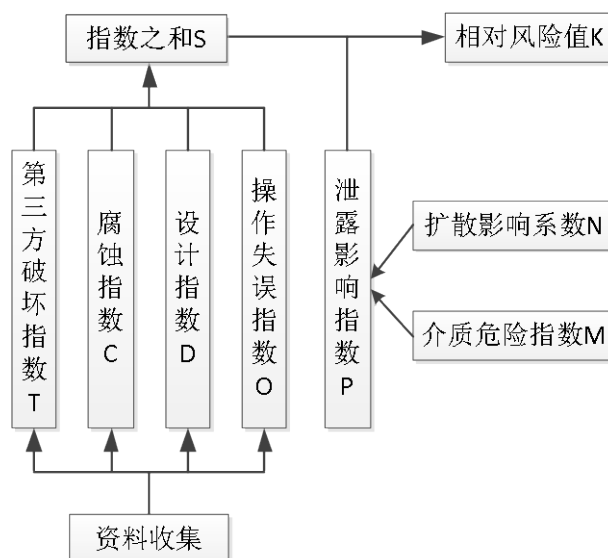


Figure 1. Kent index method frame diagram

图 1. 肯特指数法框架图

## 2.2. 实施步骤

低速风洞试验安全风险评估实施包括风险评估准备、项目评估和实施风洞试验风险管理等流程。其中，在风险评估准备阶段主要是确定评估目标、明确评估范围、建立评估组织和确定评估方法等。而项目评估过程是以顾客提出的试验需求作为评估起始点；随后由任务负责人设计试验方案、识别风洞试验项目的技术风险和安全风险，并在风险分析的基础上形成风险分析自评报告；然后交技术专家进行确认；最后由管理层对风险分析报告进行批准，作为试验团队实施风险管理的依据。

## 3. 改进方法研究

### 3.1. 肯特指数法的改进

改进思路是用分系统的风险概率指数替代肯特指数法中的影响因素的指数，用分系统风险损失指数替代泄露影响指数，而试验项目的风险指数为分系统中的最大风险指数。具体改进如下：

1) 将低速风洞试验安全风险分析在分系统层面上进行展开，包括风洞洞体、动力系统、试验模型、支撑系统、试验天平、控制系统、测量系统和试验装置等分系统。

2) 在各分系统上将指数分为风险概率指数和风险损失指数，而风险概率指数包括有人员、设备、材料、管理、环境和测试等六方面，改进后的指数模型见图 2。

3) 在模型计算过程中，引入风险指数  $A$  (反映风洞试验安全的大小)、风险概率指数  $P$  (指风洞试验时发生某风险的概率)、风险损失指数  $D$  (指风险发生后所带来的损失)、人员系数  $R$ 、设备系数  $S$ 、材料系数  $L$ 、管理系数  $G$ 、环境系数  $H$ 、测试系数  $C$ 、评定分数  $F$  和最低评定分数  $F_{\min}$ 。其中，评定分数为：

$$F = \sum(\text{单项实际评分} \times \text{三级指标系数权重} \times \text{二级指标权重})$$

$$F_{\min} = \sum(\text{单项最低定评分} \times \text{三级指标系数权重} \times \text{二级指标权重})$$

分系统风险概率指数  $P$  ( $P$  是不小于 1 的， $P$  越大则风险越大)为：

$$P = F / F_{\min}$$

分系统风险损失指数  $D$  为：

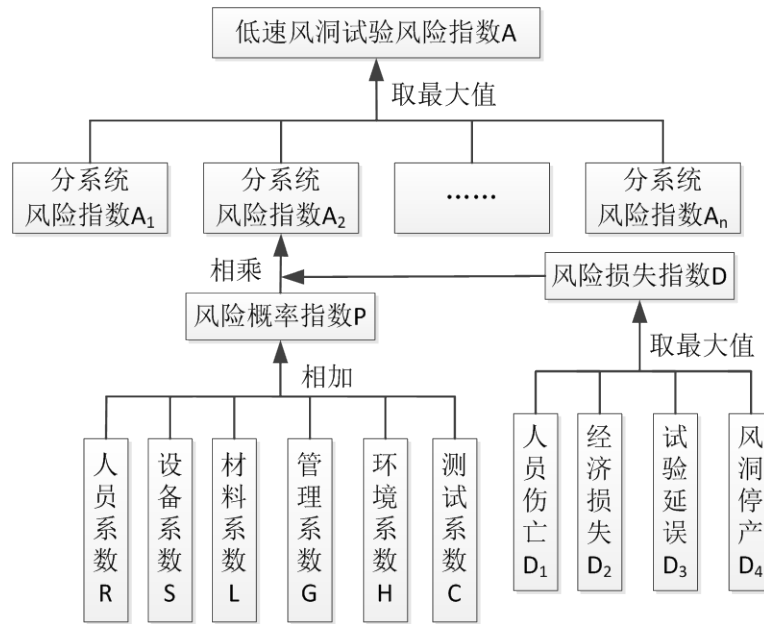


Figure 2. Improvement of Kent index method  
图 2. 肯特指数法的改进

$$D = MAX(D_1, D_2, D_3, D_4)$$

分系统风险指数  $A$  为:

$$A = P \times D$$

4) 取各分系统风险指数的最大值作为此次低速风洞试验的风险值。即

$$A = MAX(A_1, A_2, \dots, A_n)$$

### 3.2. 肯特指数法评分原则

1) 分系统指数权重是参考《公路桥梁和隧道工程施工安全风险评估指南》和《基于肯特指数法的桥梁施工安全风险评估》，并结合低速风洞试验事故原因分析结果确定的，三级指标指数权重及定性分级评分则通过专家打分并结合以往低速风洞试验事故具体原因分析初步确定的。

2) 风险损失系数主要考虑事故的直接损失(包括人员伤亡和经济损失)、试验延误和试验影响等，将风洞试验危险等级划分四级(见表 1)。

3) 将风险接收准则确定为 4 种(见表 2)。

## 4. 实例验证

### 4.1. 试验项目选取

为检验改进的指数模型是否适用于低速风洞试验，选取了几项典型试验项目(见表 3)进行验证。

### 4.2. 试验项目的风险指数评定

表 4 给出了以动力系统为例的分系统风险值评定结果，而动力系统风险损失指数结合实际取为 4。

表 5 给出了分系统的风险指数评定汇总。通过分析评定，对常规测力试验、螺旋桨带动力试验和铰链力矩试验应分别着重关注动力系统、螺旋桨带动力试验装置和试验天平的安全；同时，对螺旋桨带动

**Table 1.** Hazard grade of wind tunnel test**表 1.** 风洞试验危险等级

等级	程度	分值范围	定义(满足其中一个条件)					
			死亡	重伤	轻伤	经济损失	试验延误	风洞停产
I	灾难的	16	≥1	≥2	≥5	>50 万元	>60 天	>30 天
II	严重的	8	0	1	2~4	10~50 万元	21~60 天	16~30 天
III	轻度的	4	0	0	1	1~10 万元	8~20 天	8~15 天
IV	轻微的	2	0	0	0	≤1 万元	≤5 天	≤7 天

说明: 当多种后果同时产生时, 采取就高原则确定危险等级。

**Table 2.** Risk acceptance criteria of wind tunnel test**表 2.** 风洞试验风险接受准则

风险等级	接受准则	风险值范围	处置原则	控制方案
I	不需评审即可接受	2~10	可实施风险管理	可开展日常审视检查
II	评审后接受	10~20	宜实施风险管理, 可采取风险处理措施	宜加强日常管理监测
III	不愿接受需决策	20~50	应实施风险管理降低风险	制定实施安全性改进措施
IV	不可接受	>50	必须采取风险控制措施, 将风险降低至可接受水平	进行方案修订或调整

**Table 3.** Selecting solution of wind tunnel test**表 3.** 低速风洞试验实例选取

项目代号	项目名称	分系统说明							
		风洞洞体	动力系统	试验模型	支撑系统	试验天平	控制系统	测量系统	试验装置
XA	常规测力试验		电机超期服役, 火花偏大; 前期碳刷严重磨损	前期试验模型		1 台, 已有的			无
XB	螺旋桨带动力试验	近期末进行改造		新模型	特大攻角	5 台, 新研制 4 台	特大攻角	PXI	新研制带动力装置
XC	铰链力矩试验			新模型部件过重		10 台(新研制)			无

力试验和铰链力矩试验还应关注试验模型和动力系统(风险指数大于 10 的分系统)的安全。

表 6 给出了选取的三种典型试验项目的风险评定结果。通过风险评定将常规测力试验的风险等级确定为二级; 将螺旋桨动力试验和铰链力矩试验的风险等级确定为三级。

### 4.3. 改进效果确定

针对不愿接受的两个项目分别改进了螺旋桨带动力试验装置和铰链力矩试验天平的设备系数, 进而降低风险概率指数和风险指数, 最终降低试验项目风险等级。改进措施效果评定见表 7。

## 5. 结束语

本文在改进肯特指数法的基础上, 建立起的基于肯特指数法的低速风洞试验风险分析方法(两种评估方法的对比见表 8), 通过从人、机、料、法、环、测等六方面较为细化地评价了低速风洞试验的各分系

**Table 4.** Risk assessment of the power system  
**表 4.** 动力系统风险值评定

二级指标系数	权重	三级指标系数	权重	定性分级	给定评分		实际评分	备注				
					min	max						
人员系数	0.35	技术水平	0.4	从业资历按高级/中级/初级/学员	1	7	5					
				分系统从业经验按丰富/一般/无	1	7	4					
				人员学历按研究生/大学/中学	1	3	2					
				安全意识按强/一般/差	1	5	3					
		道德素养	0.3	操作规范程度按规范/一般规范/不规范	敬业精神按敬业/不敬业	1	5	3				
						1	3	2				
						1	3	1				
						安全防护	0.3	现场防护设备按齐全/基本齐全/无	1	7	4	
								安全设备使用按经验丰富/经验不足/无经验	1	7	4	
						使用情况	0.4	设备使用范围按规范使用/超规范使用	设备年限按正常使用/超期使用	1	16	9
1	16	1										
1	64	3										
近半年出现故障按无/小故障/大故障	1	16	7	碳刷严重磨损								
	1	16	4	电机火花过大								
设备系数	0.3	设备状态	0.4	主要设备改造情况按无/一般改造/重大改造	1	16	7	转子应急处理				
				1	16	3						
		安全防护	0.2	关键设备的保护措施按齐全/有缺陷/无	1	16	3					
					1	5	1					
		材料使用	0.6	材料使用按符合/基本符合/不符合技术要求	1	3	1					
					1	3	2					
		材料存储	0.4	安全规章制度按齐全/基本齐全/不齐全	1	3	2					
					1	7	1					
		现场安全管理	1	安全监督定期检查按经常/不经常/从不	1	7	1					
					1	7	1					
环境系数	0.1	现场环境	0.5	现场秩序按规范/基本规范/不规范	1	5	3					
				1	5	3						
		周边环境	0.5	周边环境按不影响/影响不大/严重影响	1	5	3					
1	3				3							
测试系数	0.05	测试设备	1	必要的监视测试按齐全/基本齐全/无	1	3	3	振动监视欠缺				
				1	3	3						
分系统风险概率指数	评定分数 = $\sum(\text{单项实际评分} \times \text{三级指标权重} \times \text{二级指标权重})$				2.70	29.50	8.75					
	分系统概率指数 = 评定分数 / 最小评定分数						3.24					
	分系统风险损失指数(结合具体试验项目和分系统的实际给出)						4					
	分系统风险值 = 分系统风险损失指数 $\times$ 分系统概率指数						12.96					

**Table 5.** Risk index summary of sub-system  
**表 5.** 分系统风险指数评定汇总

分系统	风险概率指数			风险损失指数			风险指数		
	XA	XB	XC	XA	XB	XC	XA	XB	XC
风洞洞体	2.29	2.29	2.29	2	2	2	4.58	4.58	4.58
动力系统	3.24	3.24	3.24	4	4	4	12.96	12.96	12.96
试验模型	2.19	2.88	3.83	2	4	4	4.38	11.53	15.32
支撑系统	1.88	1.88	1.88	2	2	2	3.77	3.77	3.77
试验天平	1.86	2.85	3.09	2	4	8	3.72	11.42	24.75
控制系统	2.05	2.05	2.05	2	2	2	4.10	4.10	4.10
测量系统	1.50	1.50	1.50	2	2	2	3.01	3.01	3.01
试验装置	/	3.77	/	/	8	/	/	30.19	/

**Table 6.** Risk assessment results of typical wind tunnel test projects  
**表 6.** 典型风洞试验项目风险评定结果

试验项目	风险指数	最危险部位	风险等级	接受准则	控制措施
常规测力(XA)	12.96	动力系统	II	评审后接受	加强对动力系统的日常管理监测
螺旋桨带动力(XB)	30.19	螺旋桨带动力试验装置	III	不愿接受需决策	地面调试解决好螺旋桨带动力装置存在的电磁干扰大、电机漏油等问题,重新评定试验项目风险指数
铰链力矩(XC)	24.75	试验天平	III	不愿接受需决策	地面加载测试并降低天平与模型间的干涉问题,同时处理部件偏重问题后重新评定试验项目风险指数

**Table 7.** Results evaluation of improvement measurement  
**表 7.** 改进措施效果评定

试验项目	分系统	改进前				安全性改进措施	改进后			
		风险概率指数	风险损失指数	风险指数	风险等级		风险概率指数	风险损失指数	风险指数	风险等级
螺旋桨带动力	试验装置	3.77	8	30.19	III	通过地面调试改善电机的电磁干扰和漏油问题	1.82	8	14.54	II
铰链力矩	试验天平	3.09	8	24.75	III	指派经验丰富的人员参加试验,通过地面处理改善与模型的干涉问题	2.05	8	16.40	II

**Table 8.** Methods comparing of risk evaluation in the low speed wind tunnel test  
**表 8.** 低速风洞试验风险评估方法对比

项目	现有的评估方法	改进后的评估方法
风险评估方法	定性评估(安全检查表法)	定量评估(肯特指数法)
评价主体	从设备和方法上展开评价	针对各分系统从人、机、料、法、环、测等六方面展开评价
评价人员	任务负责人	试验团队(含任务负责人)
细化程度	笼统	较为细化
主观因素影响	大	较小
作用发挥	在安全评估上发挥作用	在安全评估、试验管理、人员安排和现场管控等方面发挥作用

统所存在的安全风险,克服了现有方法主观因素影响大的缺点,初步实现了对低速风洞试验安全风险定量分析,可较好地评价出试验风险发生的可能性,为今后低速风洞试验安全控制水平的提高提供了技术支持。同时,通过该方法的实施,可为低速风洞试验项目在试验管理、人员安排和现场管控等方面提供技术指导。下一步,将进一步改进指数权重和完善计算模型,促进该风险分析方法的推广应用。

### 参考文献 (References)

- [1] 王勋年,编,低速风洞试验[M].北京:国防工业出版社,2002:7-9.
- [2] 王发祥,编,高速风洞试验[M].北京:国防工业出版社,2003:3-3.
- [3] 俞素平.现浇桥梁施工安全风险评估的模糊层次分析法[J].四川理工学院学报(自然科学版),2014,27(3):70-74.
- [4] 王者超,陆宝麒,李术才,等.地下水封石油洞库施工工期安全风险评估研究[J].岩土工程学报,2015,37(6):1057-1067.
- [5] 林少华,刘嘉宁,陈东,等.基于故障树理论的电网调度操作实时风险评估[J].电力自动化设备,2014,34(5):121-125.
- [6] 张春涛,史永胜,宋云雪.航空发动机持续适航安全风险评估方法研究[J].飞机设计,2014,34(2):48-51.
- [7] 李江,雷晓刚.基于 Multi-Agent 技术的大型航天研发项目风险分析方法[J].国防科技大学学报,2012,34(6):148-152.
- [8] 陈洁金,张永杰.下穿既有桥梁隧道施工风险定量评估方法[J].中南大学学报(自然科学版),2015,46(5):1862-1868.
- [9] 任刚,余燕.模糊评价在生化分析实验室安全风险评价中的应用[J].实验室研究与探索,2013,32(8):489-492.
- [10] 张黎.高校建筑模型实验室的安全风险评估[J].实验室研究与探索,2013,32(5):239-241.
- [11] 王栋.基于动态故障树分析的民用飞机辅助动力装置系统安全性评估[J].民用飞机设计与研究,2014,29(3):48-52.
- [12] 任玉清,姚杰,张飞成,等.安全检查表法在渔船救生设备安全评价中的应用[J].渔业现代化,2015,42(1):72-75.
- [13] 刘桂艳,张喜刚.层次分析法在高校实验室压力容器安全评价中的应用[J].实验技术与管理,2011,28(3):51-54.
- [14] 靳慧斌,洪远,蔡亚敏.基于因子分析的机场运行安全评价模型[J].工业安全与环保,2015,41(6):62-65.
- [15] 张景楠,李华旺,朱野,等.一种低轨卫星网络的概率风险评估方法研究[J].电子设计工程,2014,22(14):4-6.
- [16] 陆新鑫,徐秀丽,李雪红,等.基于肯特指数法的桥梁施工安全风险评估[J].中国安全科学学报,2013,23(6):165-171.
- [17] 赵蕾,卢浩,王明洋,等.改进肯特指数法在地铁施工风险评估中的应用[J].武汉理工大学学报,2012,34(2):97-102.
- [18] 靳书斌,侯磊,杨玉锋.基于 Kent 法的 PE 燃气管道风险评价指标体系[J].煤气与热力,2014,34(3):B34-B37.
- [19] 石磊明,刘蓉.肯特法在城市燃气管道风险分析上分项调整研究[J].北京建筑工程学院学报,2012,28(3):19-22.



**知网检索的两种方式：**

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2328-0557，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：[ijfd@hanspub.org](mailto:ijfd@hanspub.org)