



装备科技译著出版基金

材料与结构的疲劳

Fatigue of Materials and Structures

[法] Claude Bathias André Pineau 著
吴圣川 李源 王清远 译

8



国防工业出版社
National Defense Industry Press



装备科技译著出版基金

材料与结构的疲劳

Fatigue of Materials and Structures

[法] Claude Bathias André Pineau 著

吴圣川 李源 王清远 译

国防工业出版社

·北京·

著作权合同登记 图字:军-2014-096号

图书在版编目(CIP)数据

材料与结构的疲劳/(法)巴蒂亚斯,(法)皮诺编;
吴圣川,李源,王清远译. —北京:国防工业出版社,
2016.4

书名原文:Fatigue of Materials and Structures

ISBN 978-7-118-10703-6

I. ①材… II. ①巴… ②皮… ③吴… ④李…
⑤王… III. ①金属疲劳 IV. ①TG111.8

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第049780号

Fatigue of Materials and Structures by Claude Bathias and André Pineau

ISBN978-1-84821-051-6

© ISTE Ltd 2010

All rights reserved. Authorized translation from the English language edition published by John Wiley & Sons Limited. Responsibility for the accuracy of the translation rests solely with National Defence Industry Press and is not the responsibility of John Wiley & Sons Limited. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyright holder, John Wiley & Sons Limited.

Copies of this book sold without a Wiley sticker on the cover are unauthorized and illegal.

本书简体中文版由 John Wiley & Sons, Inc. 授权国防工业出版社独家出版。

版权所有,侵权必究。

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号 邮政编码100048)

三河市众誉天成印务有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 710×1000 1/16 印张 20¼ 字数 390千字

2016年4月第1版第1次印刷 印数 1—2000册 定价 99.00元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

正常服役条件下,机械部件或结构的破坏绝大多数是由疲劳引起的,结构的完整性一直是阻碍工业发展的重要因素。19世纪60年代,德国工程师 Wöhler 通过试验绘制出第一条疲劳寿命曲线,成为现代抗疲劳设计及应用里程碑。通过对材料宏观疲劳行为和微观机理的研究,深入到疲劳损伤的各个阶段,提出了许多改善疲劳强度和延长结构疲劳寿命的技术措施。在工程应用中,形成了结构抗疲劳设计的若干准则和服役寿命模型,对保证结构的安全运行、减少生命财产的损失,起到了重要的作用。虽然疲劳研究的历史已近一个世纪,取得了一系列的重大成果,但疲劳研究仍是当前学术界和工业界所关注的重要课题。

疲劳理论与工程应用研究的发展,不仅需要疲劳研究人员的努力,还有赖于相关学科、技术和工业的发展。电子显微镜、电液伺服疲劳试验机与电子计算机的应用,不仅可在等幅载荷下进行控制波形、频率、温度和环境介质的应力和应变疲劳试验,提供精确、可靠的疲劳试验数据,还可在随机谱下进行部件以至全尺寸结构的疲劳试验,获得的试验数据可用于验证疲劳寿命的预测模型。20世纪50年代以来,受益于线弹性断裂力学的发展和试验技术的巨大进步,疲劳裂纹扩展的力学模型、疲劳裂纹扩展速率表达式、疲劳裂纹扩展寿命的预测模型先后建立。在工程应用中,材料疲劳性能数据大都在等幅载荷下测定的,而实际结构承受的多是变幅载荷,只有将变幅载荷下的疲劳损伤折算为等幅载荷下的疲劳损伤,才能进行结构的服役寿命预测和估算。此外,材料与结构的疲劳性能还受到周围液相或气相环境的影响。例如,常见的腐蚀疲劳是指金属材料在腐蚀介质和循环载荷共同作用下的复杂响应,它通常用于描述水相环境下材料的疲劳行为。因此,有必要深入研究在环境介质因素影响下结构的抗疲劳设计问题。

本书是法国巴黎第十大学资深教授 Claude Bathias 所著的一本关于材料与结构疲劳性能的专著,全面、深入、系统地介绍了当前材料与结构抗疲劳设计领域的最新成果及研究进展(包括裂纹闭合、变幅加载、鱼眼现象等),按照章节顺序阐述了低周、高周、超高周疲劳裂纹萌生和扩展寿命的试验技术及估算方法,同时从断裂力学(短裂纹行为、尖端塑性区等)和试验观测(如 Paris 唯象模型等)角度揭示

了材料疲劳损伤演变的微观机理(如夹杂、裂纹等缺陷)及外部条件(如加载模式、腐蚀、环境介质等),尤其给出了多种材料(金属单晶、合金及非金属等)丰富的疲劳实测数据和珍贵的显微观察照片。

该书中的内容源自作者长期在低周、高周尤其是超高周疲劳断裂和复合材料疲劳领域的教学和工程实践经验,各章节均采用详实的试验示例进行图解说明。本书由西南交通大学的吴圣川副教授、国防科技大学的李源副教授、四川大学的王清远教授合作翻译,译者本着忠实原文的原则,做了大量艰苦细致的工作,质量很高,可以说是不可多得的,是近年来译著中的佳作。

该书的出版对于从事材料与结构抗疲劳断裂设计的工程技术人员、高等院校相关专业的师生全面了解材料及结构疲劳的总体方法学具有较高的参考价值,对工程实践亦具有很好的指导作用。

中国科学院 院士



2015年12月

Bathias 教授是国际超高周疲劳界当之无愧的泰斗,我首次见到他是 2013 年 6 月在北京国际会议中心举办的第十三届国际断裂大会上。当时的 Bathias 教授精神矍铄、思维敏捷,对年轻人却有着异常的喜爱、耐心与支持。他在得知国防工业出版社资助翻译这本书的消息后非常高兴,每次给我大篇幅的释疑回信都在凌晨,可以窥见他即使在出差时也保持的严谨的学术态度。2014 年,他盛情邀请我和学生去法国学习和交流,当时他手舞足蹈,像个孩子似的带领我们参观并详细介绍他的研究室和试验设备,同时就我事先准备好的一些翻译事宜及疑难问题一一给予了解答,还与 Pineau 教授联系确认,并亲笔签名送我一本最新著作 *Fatigue Limit in Metals*。2015 年春节期间,王清远教授赴法期间拜会恩师,深入谈及了翻译中的这本专著,并欣然准备撰写中文版序言,但是 4 月 6 日我们便惊悉 Bathias 教授与世长辞的噩耗,实为国际材料与结构疲劳界的一大损失,这给了我们很大的压力和动力完成本书的翻译。在我 4 月 15 日主办的“工程结构抗疲劳断裂仿真学术研讨会”后一段时间内,王清远教授再次认真修订已完成的译稿,接着我再用近 4 个月的时间逐字校对,目的就是确保把本书准确无误地呈献给国内的读者,这也是为什么本书一再推迟出版的重要原因。

2013 年 6 月—2016 年 2 月两年多的时间内,我与国防科学技术大学李源副教授、四川大学王清远教授经历了炼狱过程。作为第一译作者,对 Bathias 教授的叮嘱铭记在心,坦诚来说,原著中每一个单词、每一个句子、每一个标点符号、每一张图、每一篇参考文献,我都重新进行了梳理、绘制、翻译、查阅和校核,这种工作远远超出了我的心理和体力。通过本书的翻译,我也对材料与结构的抗疲劳设计有了更为全面而深刻的理解,希望本书的出版是对 Bathias 教授最好的告慰,同时向国内读者呈现出我们最好的态度。但由于时间和自身专业水平极为有限,翻译中仍难免有不妥之处,恳请读者批评指正。

对本书做出重要贡献的人员还有:长沙师范学院李若兰讲师,国防科学技术大学袁杰红教授、周仕明讲师、彭文强讲师及武警硕士、马晓凯硕士,中航工业北京航空制造工程研究所车志刚副研究员,四川大学王宠副教授,美国西北大学喻程博

士,西南交通大学梅桂明副研究员和胡雅楠硕士、张思齐硕士、赵晨硕士,以及湖南大学王晓钢副教授、龙湘云博士、李博川博士。还要衷心感谢国防工业出版社牛旭东编辑,他的不断鼓励也是确保翻译质量的重要支撑。

感谢国家“973 项目”(高速、重载轮轨系统金属材料与服役安全基础研究,批准号 2015CB654801)、国家自然科学基金项目(高速列车焊接构架抗疲劳断裂可视化设计软件研发,批准号 11572267;复杂载荷环境下超长寿命疲劳振动加速综合试验系统研制,批准号 11327801;疲劳动态损伤下耗散能模型参量的计算反求方法,批准号 11402297)、动力灾变力学教育部创新团队滚动支持项目(批准号 IRT14R37)、牵引动力国家重点实验室开放基金项目(高速车体焊缝气孔与超高周疲劳鱼眼机制,批准号 2015TPL_T07;基于三维 EBSD 的动车组车体焊缝疲劳断裂机理,批准号 TPL1505;焊接结构湿环境下的疲劳失效及可靠性评估研究,批准号 TPL1503;基于混合模拟及全场法的高速受电弓疲劳性能研究,批准号 TPL1409)以及湖南大学汽车车身先进设计制造国家重点实验室开放基金项目(车身材料疲劳耗散能及其在疲劳性能快速预测中的应用,批准号 31315005)对本部译著工作的资助。同时感谢南车青岛四方机车车辆股份有限公司和常州南车铁马科技实业有限公司对有关疲劳与断裂研究项目的支持。

由于译者水平有限,译作错误在所难免,恳请读者批评指正。

Email:wusc@swjtu.edu.cn

吴圣川

2016 年 3 月

第1章 疲劳导论:基础理论与方法	001
1.1 材料的疲劳	001
1.1.1 疲劳简史:技术与科学的重要性	001
1.1.2 相关概念定义	004
1.1.3 耐久性图	005
1.2 疲劳损伤的机制	006
1.2.1 引言	006
1.2.2 疲劳裂纹萌生	007
1.2.3 疲劳裂纹扩展	008
1.3 疲劳试验系统	009
1.4 结构的抗疲劳设计	010
1.5 塑料、橡胶及复合材料的疲劳	011
1.6 本章小结	013
第2章 疲劳寿命估算	014
2.1 引言	014
2.2 疲劳数据的离散性	015
2.3 疲劳极限的估算	016
2.4 疲劳强度及标准差的估算	016
2.4.1 概率元法	017
2.4.2 升降法	020
2.4.3 迭代法	022
2.4.4 多试样法	025
2.4.5 方法选择	027
2.5 疲劳寿命的数学表达	028

2.5.1	引言	028
2.5.2	应力寿命公式	028
2.5.3	试验曲线的修正	030
2.6	循环周次的估计	033
2.6.1	基本原理	034
2.6.2	绘制过程	034
2.6.3	应用举例	035
2.7	力学参数对疲劳极限的影响	035
2.7.1	平均应力的影响	035
2.7.2	荷载类型的影响	036
2.8	疲劳极限与力学性能关系	038
2.8.1	疲劳极限 σ_d 的估算	038
2.8.2	标准差估计	038
2.8.3	结论	039
第3章	疲劳裂纹萌生	040
3.1	引言	040
3.2	裂纹萌生的物理机制	040
3.2.1	疲劳失效过程:回顾	040
3.2.2	应力幅的影响	042
3.3	裂纹萌生的评估	047
3.3.1	光滑试样	047
3.3.2	缺口效应	047
3.4	裂纹萌生的寿命估算	058
3.4.1	引言	058
3.4.2	存在的问题	058
3.4.3	裂纹萌生参数	058
3.4.4	主 Wöhler 曲线	059
3.4.5	累积损伤准则	060
3.4.6	$K_t > 1$ 试样的曲线	061
3.4.7	参考曲线	062
3.4.8	绘制参考曲线	063
3.4.9	结论	063
第4章	低周疲劳	064
4.1	引言	064

4.1.1	低周疲劳适用性	064
4.1.2	试验方法	066
4.2	低周疲劳的唯象解释	069
4.2.1	引言	069
4.2.2	循环加工硬化	070
4.2.3	循环应力-应变关系曲线	072
4.2.4	疲劳强度	074
4.2.5	数学模型	075
4.2.6	加载顺序及控制方式	076
4.3	低周疲劳开裂及顺应机制	077
4.3.1	引言	077
4.3.2	材料的顺应性	078
4.3.3	钢的顺应机制	088
4.3.4	低周疲劳裂纹萌生	096
4.3.5	低周疲劳裂纹扩展	100
4.4	本章小结	101
4.5	致谢	102
第5章	超高周疲劳	103
5.1	疲劳寿命	103
5.2	超高周疲劳试验	104
5.2.1	压电试验机	104
5.2.2	振动疲劳原理	105
5.2.3	共振波长	106
5.2.4	试样设计	106
5.2.5	超声波发生器	108
5.3	压电疲劳试验系统	109
5.4	超高周疲劳 $S-N$ 曲线	109
5.4.1	疲劳 $S-N$ 曲线的基本特征	109
5.4.2	黑色金属材料	111
5.4.3	铝合金材料	122
5.5	超高周疲劳裂纹萌生机理	123
5.5.1	非金属夹杂	124
5.5.2	基体冶金缺陷	125
5.5.3	微孔洞	125
5.6	疲劳强度的评估	128

5.6.1	统计方法比较	128
5.6.2	超高周疲劳 Kitawaga 图	129
5.6.3	基于 Paris - Hertzberg 准则的裂纹萌生寿命评估	130
5.6.4	基于 Murakami 模型的疲劳强度预测	132
5.7	本章小结	133
第 6 章	疲劳裂纹扩展速率	134
6.1	引言	134
6.2	裂纹扩展速率模型	134
6.2.1	唯象模型	134
6.2.2	基于位错理论的模型	137
6.2.3	基于裂尖材料行为的模型	140
6.2.4	基于材料循环特性的模型	142
6.3	模型评价	144
6.3.1	循环参数的影响	145
6.3.2	扩展常数 C 和 m 关系	146
6.3.3	材料属性对裂纹扩展的影响	147
6.3.4	外部条件对裂纹扩展的影响	149
6.4	展望	150
6.5	本章小结	151
6.5.1	固有属性参数	152
6.5.2	外部试验条件	152
第 7 章	短裂纹扩展	153
7.1	引言	153
7.2	线弹性断裂力学的局限性	154
7.2.1	光滑边裂纹	154
7.2.2	缺口根部裂纹	155
7.3	试验观测	157
7.3.1	短裂纹扩展速率	157
7.3.2	微观组织短裂纹	158
7.3.3	物理短裂纹	160
7.4	短裂纹闭合效应	163
7.4.1	裂纹的闭合现象	163
7.4.2	短裂纹闭合的演变	165
7.4.3	扩展速率与 ΔK_{eff} 的关系	166

7.4.4	粗糙度致裂纹闭合	166
7.5	短裂纹扩展模型	166
7.5.1	微观组织短裂纹扩展模型	166
7.5.2	物理短裂纹扩展模型	170
7.6	本章小结	174
第8章	裂纹尖端的塑性变形	176
8.1	引言	176
8.2	疲劳裂纹尖端的塑性变形	176
8.2.1	理论方面	177
8.2.2	试验验证	180
8.2.3	细观晶粒尺度	182
8.3	疲劳断口形貌分析	183
8.3.1	断口形貌观测	183
8.3.2	疲劳辉纹的形成机制	184
8.4	基于尖端张开位移的裂纹扩展模型	185
8.5	基于循环硬化的裂纹扩展模型	187
8.6	基于有效应力强度因子的裂纹扩展模型	188
8.6.1	Elber 模型	188
8.6.2	Elber 模型的应用	190
8.6.3	裂纹闭合机制的解释	190
8.7	本章小结	194
第9章	疲劳裂纹扩展的局部解法	195
9.1	引言	195
9.2	裂尖塑性区	195
9.2.1	Irwin 塑形区	195
9.2.2	T 应力场	197
9.2.3	材料应变硬化效应	197
9.3	裂尖循环塑性变形	199
9.3.1	循环弹塑性行为	200
9.3.2	塑性历程效应	201
9.4	疲劳裂纹扩展的局部解法	207
9.4.1	比例扩展法简介	207
9.4.2	比例扩展法原理	207
9.4.3	模型验证	209

9.4.4 推广应用	210
9.5 本章小结	211
第 10 章 腐蚀疲劳	212
10.1 引言	212
10.2 裂纹萌生	212
10.2.1 水性介质	212
10.2.2 气相环境	216
10.3 短裂纹扩展	216
10.4 长裂纹扩展	217
10.4.1 试验观测	217
10.4.2 腐蚀疲劳模型	222
10.5 本章小结	224
第 11 章 环境的影响	225
11.1 引言	225
11.2 环境对高周疲劳的影响	226
11.2.1 早期研究	226
11.2.2 微观机制	226
11.2.3 大气压力及频率的影响	228
11.2.4 微观组织和环境的综合影响	229
11.2.5 温度和环境的耦合行为	230
11.2.6 超高周疲劳下环境的影响	230
11.3 环境对疲劳裂纹扩展的影响	232
11.3.1 早期研究	232
11.3.2 惰性环境下的裂纹扩展特性	233
11.3.3 环境加速效应	237
11.3.4 裂纹的扩展形貌	241
11.3.5 多因素协同作用	243
11.4 本章小结	252
第 12 章 变幅疲劳加载	254
12.1 引言	254
12.2 变幅加载相关问题	255
12.2.1 变幅加载的必要性	255
12.2.2 加载信号	257

12.2.3	从服役记录到载荷谱	260
12.3	变幅加载疲劳试验	267
12.3.1	模拟试验方法	267
12.3.2	试验系统	267
12.3.3	块谱试验	268
12.3.4	变幅疲劳试验及载荷谱	269
12.3.5	随机加载试验	270
12.3.6	测试结果分析	271
12.4	变幅疲劳试验的影响因素	273
12.4.1	重建载荷谱的计数法	273
12.4.2	载荷水平个数	273
12.4.3	载荷次序效应	273
12.4.4	加载频率	274
12.4.5	高应力信号局限性	274
12.4.6	不规则因子	274
12.4.7	载荷谱的类型	275
12.4.8	小载荷循环	275
12.4.9	加速疲劳试验	276
12.5	变幅载荷下的疲劳寿命评估	278
12.5.1	疲劳寿命的预测方法	278
12.5.2	多轴载荷特性	278
12.5.3	非循环计数法	279
12.6	本章小结	280
参考文献		282

第 1 章

疲劳导论:基础理论与方法

1.1 材料的疲劳

1.1.1 疲劳简史:技术与科学的重要性

实践表明,正常服役条件下,机械部件或结构的破坏绝大多数是由疲劳引起的,结构完整性也一直是阻碍工业发展的重要因素,这种影响从 19 世纪机械制造业的发展中就可以看出。例如,1842 年法国凡尔赛铁路车轴的疲劳断裂事故造成了 60 余人伤亡^[1],与 1954 年“彗星”号飞机相撞导致的死亡人数相当,类似的严重事故对工业革命尤其是交通产业的发展带来了巨大影响。

众所周知,疲劳导致的总损失达到了工业总产值的几个百分点,因此,关于材料与结构疲劳的专题研究迅速增加。通过检索 EI 数据库, Totoh 发现在 1988—1993 年间共发表了约 10000 篇疲劳方面的文章,年均 2000 篇左右^[2]。

据 Schütz 所述^[3], Braithwaite 于 1854 年就提出了“金属疲劳(Metal fatigue)”概念^[4]。Lemaitre 认为^[5],早在 1839 年 Poncelet 演讲中就曾提及该词,随后 Rankine 在 1843 年引用了这一术语。若需要进一步了解 Poncelet 和 Rankine 在该领域的贡献,请参阅 Timoshenko 的力作 *History of Strength of Materials*^[6]。事实上,这一概念可能已经存在了较长时间。例如,Stendhal 在 1838 年发表的一篇《旅行记忆》中曾使用了“疲劳”一词^[7],在去意大利 Civitavecchia 与 Consul 见面的路上,当穿过卢瓦尔河时,一根车轴突然断裂,他在日记中这样写道:

“……4 月 13 日正当穿过沙利特小镇时,马车的车轴突然断裂,这使得我整个上午都在思考车轴的材料问题,不由自责:要是我有一辆自己的马车,一定要换一个更好的 Fourvoirie 车轴,选 6 个低碳钢杆,亲眼看着锻造加工……我发现断口上的晶粒已经变大,显然已使用了很长时间……”

在 19 世纪的很长一段时间内,人们都认为铁的“结晶”主要源于机械振动。

事实上,与 Poncelet 生活在同一时期的 Stendhal 对疲劳问题已有了深入认识,至少在当时这种破坏形式已不足为奇。因为在 1812 年,他们在俄罗斯一同为拿破仑作战,姑且认为他们之间已经深入讨论过这一问题。

目前有非常多关于疲劳研究的优秀综述文章,一些还是近期发表的。例如, Schütz 的综述列出了 550 多篇参考文献^[3],以及 Totoh^[2]和 Schijve^[8]的文章,而最近发表的有关疲劳研究方面的成果也非常值得关注^[9-17]。目前,有两本专注于疲劳研究的国际期刊: *Fatigue Fract Eng M* 和 *Int J Fatigue*。一些国家和地区的学术组织也定期召开疲劳问题的研讨会,如美国 ASTM(美国材料与试验协会)和法国 SF2M(法国材料与冶金协会)。

表 1-1 总结了材料与结构疲劳研究中一些具有里程碑意义的重要事件。例如,前面曾提及的车轴断裂问题在铁路发展中具有重要意义,它促使德国工程师 Wöhler 在各种破坏事故的分析中对疲劳损伤进行了系统的研究。

表 1-1 疲劳研究中的里程碑事件

年份	标志性事件	年份	标志性事件
1842	Meudon 铁路事故	1953—1954	低周疲劳的 Manson - Coffin 公式
1858	Wöhler 出版第一部专著	1954	“彗星”号事故
1860—1870	基于 Wöhler 含缺口光滑车轴弯曲和扭转试验的平均应力	1956	Irwin 提出应变能释放率概念
1881	Bauschinger 开展低周疲劳试验研究	1960	液压伺服疲劳试验机的问世
1910	Basquin 定律	1961	Paris 定律的提出
1913	Inglis 求解缺口处应力分布	1968	Elber 提出有效应力强度因子概念
1920	基于能量守恒的 Griffith 裂纹萌生机制	1988	Aloha B737 飞机事故
1930	Peterson 的应力集中因子和疲劳极限概念	1989	DC 10 Sioux 城市事故
1937	求解缺口效应的 Neuber 法	1996	Pensacola 事故
1939	Weibull 统计律	1998	ICE Eschede 铁路事故
1945	疲劳线性累积损伤的 Miner 准则	2006	洛杉矶 B767 飞机事故

与火车等机械类似,飞行器也极易受疲劳的影响。1954 年“彗星”号飞机相撞和 1988 年波音 737 飞机失事是发生最早和最近的两起航空器疲劳破坏事故。从图 1-1 可以看出,飞机的疲劳破坏十分严重,该事故源于机身铆接区中的腐蚀疲劳裂纹,此后的研究人员对多点疲劳损伤问题进行了大量研究。

另一起事故是 1988 年美国苏城发生的 DC 10 飞机失事(见图 1-2),主要起因于其中一台发动机的爆炸。最近一起是发生在美国佛罗里达州首府的 MD88 飞机失事,主要原因是在发动机扇盘孔边的缺陷处萌生了裂纹,并最终导致一台发动机发生了疲劳断裂破坏,如图 1-3 所示。



图 1-1 檀香山国际机场上波音 737 事故飞机

图 1-2 美国苏城机场 DC 10 飞机
撞击事故中的发动机

(a)



(b)

图 1-3 佛罗里达 MD88 飞机失事后发动机断裂现场

这些航空飞行事故并非说明飞机是最危险且唯一受到疲劳影响的运载工具,相反地,如果从飞行距离与乘客人数之比上看,它仍然是最安全的交通工具。不过鉴于民航业的快速发展,即便在设计、生产和定期维修中采用了抗疲劳研究的最新成果,可预见未来 10 年的每周仍可能发生重大的飞行安全事故(见图 1-4)。

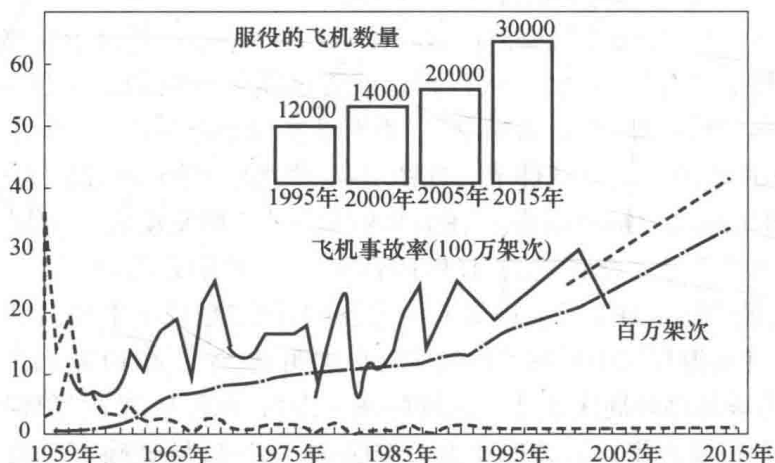


图 1-4 运营飞机数及其事故预测(见 1001crash.com)