



航天科技图书出版基金资助出版

航天器微振动 ——理论与实践

董瑶海 著



中国宇航出版社

航天科技图书出版基金资助出版

航天器微振动——理论与实践

董瑶海 著



中国宇航出版社

版权所有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

航天器微振动：理论与实践 / 董瑶海著. -- 北京：
中国宇航出版社，2015.1

ISBN 978 - 7 - 5159 - 0883 - 0

I. ①航… II. ①董… III. ①航天器—振动—研究
IV. ①V414.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 311643 号



责任编辑 杨 洁

封面设计 文道思

出版 中国宇航出版社
发行

社址 北京市阜成路 8 号 邮编 100830
(010)68768548

网址 www.caphbook.com

经销 新华书店

发行部 (010)68371900 (010)88530478(传真)
(010)68768541 (010)68767294(传真)

零售店 读者服务部 北京宇航文苑
(010)68371105 (010)62529336

承印 北京画中国画印刷有限公司

版次 2015 年 1 月第 1 版

2015 年 1 月第 1 次印刷

规格 787 × 1092

开本 1/16

印张 18.75

字数 450 千字

书号 ISBN 978 - 7 - 5159 - 0883 - 0

定价 158.00 元

本书如有印装质量问题，可与发行部联系调换

航天科技图书出版基金简介

航天科技图书出版基金是由中国航天科技集团公司于 2007 年设立的，旨在鼓励航天科技人员著书立说，不断积累和传承航天科技知识，为航天事业提供知识储备和技术支持，繁荣航天科技图书出版工作，促进航天事业又好又快的发展。基金资助项目由航天科技图书出版基金评审委员会审定，由中国宇航出版社出版。

申请出版基金资助的项目包括航天基础理论著作，航天工程技术著作，航天科技工具书，航天型号管理经验与管理思想集萃，世界航天各学科前沿技术发展译著以及有代表性的科研生产、经营管理译著，向社会公众普及航天知识、宣传航天文化的优秀读物等。出版基金每年评审 1~2 次，资助 10~20 项。

欢迎广大作者积极申请航天科技图书出版基金。可以登录中国宇航出版社网站，点击“出版基金”专栏查询详情并下载基金申请表；也可以通过电话、信函索取申报指南和基金申请表。

网址：<http://www.caphbook.com>

电话：(010) 68767205, 68768904

序 一

随着我国高分辨率遥感卫星的发展，卫星指向精度和观测分辨率不断提高，其搭载的各类高精度、高敏感度的有效载荷对平台的微振动环境提出了越来越高的要求。因此探讨微振动的产生机理、研究微振动的抑制措施、评估微振动对敏感载荷的影响等成为近年来发展高分辨率遥感卫星必须解决的关键问题。

非常欣慰地看到，作者能够及时总结并固化当前多颗高分辨卫星研制过程中微振动问题的研究成果，并撰写形成专著。通过对微振动测量、分析与抑制技术的系统阐述，将读者带入微振动这个全新的研究领域。

全书结合具体型号需求，紧紧围绕微振动产生机理、影响分析、微振动仿真、微振动抑制以及微振动测试五个方面，系统展开研究和探讨，为卫星微振动问题研究提供了参考，填补了国内卫星微振动相关参考书籍的空白。

本专著作者是从事了多年航天工程的研究员和高级设计师，他将自己丰富的知识和经验融入到专著中，理论与实践密切结合，取材精炼，使得专著既具有很高的学术水平又具备很强的工程实用价值。

愿该书早日出版。

孟执中

2014年10月

序 二

当前，卫星遥感技术突飞猛进，新一代遥感对地观测卫星在分辨率、数据质量和精度等方面都有了很大的提高，这对卫星平台的精度、稳定性、安静性等方面也提出了新的、更高的要求。研究并掌握影响平台稳定性、安静性的相关技术已成为研制高分辨率遥感卫星必须解决的问题之一。

航天器微振动技术是研究并改善航天器在轨力学环境、提高平台安静性的综合性工程技术，是天基遥感向更高分辨率方向发展的核心技术之一。微振动相关分析仿真和试验项目已逐步成为遥感卫星研制流程中不可或缺的组成部分。因此，及时梳理、总结并出版微振动专著来帮助航天技术人员迅速地了解、进入航天器微振动领域具有里程碑意义。

进入一个领域通常分两步走：第一步，是学习。掌握该领域的基本概念、基本理论和基本方法。第二步，就是实践。必须要将学到的理论知识运用到具体的工程实践中，如果没有应用过程，就不可能领会理论和方法的精髓。我欣喜地看到本专著充分考虑了上述问题，它在讲述微振动理论知识的同时，不断地引入工程实际，并详细地描述了如何将其运用到实际问题中，其提炼出的宝贵经验可以加快后来者进入角色，做好微振动方面的相关工作。

热烈祝贺本书的出版，希望同志们在使用过程中，能够提出宝贵的意见，供作者修改书稿时参考，使之更加充实、完善，为微振动技术的发展发挥更大的作用。

代守仑

2014年11月

前言

进入 21 世纪以来,航天技术迅猛发展,特别是近几年来随着对高分辨率遥感的迫切需求,航天领域高精度、高分辨率等相关技术的研究获得了极大的推动,应运而生了微振动这一新的学科领域。微振动技术是一门既有基础理论,又有广泛实际应用背景,并正在不断完善和发展的交叉型工程应用性学科。

微振动是指航天器在轨运行期间,由于航天器内部运动部件正常工作和外部环境力学效应等引起的航天器结构上幅度较小的往复运动或振荡。它直接影响着航天器有效载荷(尤其是高分辨率成像类载荷和大容量的激光通信载荷等)的测量精度、成像或通信质量等。微振动技术就是研究并改善航天器微振动环境的技术,包括微振动对有效载荷影响机理、振源特性、仿真分析、主/被动抑制以及测量与试验等。上述研究方向呈现出微振动技术多学科交叉融合的特点,其学科基础包括数学、力学、自动控制、电子技术、传感器与测试技术、信号处理、转子动力学等。

本书主要介绍了作者多年来在微振动领域的研究成果,内容涉及微振动测试、分析及抑制等多个方面;力求既注重基本概念和基本原理的讲述,又注重理论与应用的结合,并着重突出近年来实际工程应用中取得的成功案例。

全书共分为 9 个章节,第 1 章主要介绍微振动的基本概念和特点、国内外的研究现状等;第 2 章以光学载荷为例介绍了微振动对敏感载荷的影响;第 3 章介绍了航天器中各类微振动振源,包括其产生机理及特性等;第 4 章介绍了微振动仿真分析相关流程和方法;第 5、6、7 章分别针对振源和敏感载荷两个方面,从主动和被动两种技术手段上对常用的微振动抑制措施进行了介绍,内容涉及动力吸振、颗粒阻尼减振、被动隔振以及主动隔振等;第 8 章介绍了航天器挠性附件振动抑制技术,重点介绍了利用绳索对挠性太阳翼进行错频设计的方法;第 9 章介绍了航天器微振动试验相关技术。

下列人员在本书的创作过程中作出了重要贡献:第 1 章周徐斌、申军烽;第 2 章胡宜宁、张如意;第 3 章赵发刚、周春华;第 4 章蒋国伟、周徐斌;第 5 章虞自飞、黄俊杰;第 6 章申军烽、刘兴天、杜冬;第 7 章沈海军、钟鸣;第 8 章薛景赛、杜三虎;第 9 章周宇、赵海斌、姚赛金。

本书的写作过程中,始终得到了上海航天技术研究院陈文强研究员的热心指导和鼓励;本书初稿完成后,由多位专家进行了审稿,并提出了许多宝贵的意见和建议,他们是

浙江大学徐之海教授、上海交通大学陈进教授、上海交通大学华宏星教授、北京航空航天大学黄海教授、同济大学聂国华教授，在此表示感谢！本书的出版得到了上海卫星工程研究所空间机热一体化技术实验室、风云四号卫星项目办、中国宇航出版社等的支持，谨在此一并表示由衷的感谢。本书的完成得到了民用航天项目（批复号：科工技[2013]669号）和上海市科委优秀技术带头人计划课题项目（项目编号：14XD142300）的资助。

由于作者水平、能力和经验有限，书中疏漏和不妥之处在所难免，恳请广大读者批评指正。

作者

2014年11月

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 微振动的概念与内涵	1
1.2 微振动的主要影响	4
1.3 微振动研究体系	7
1.3.1 微振动研究的主要内容及其内在联系	7
1.3.2 微振动研究规划	9
1.4 本书章节安排	10
第 2 章 微振动对光学载荷性能的影响	12
2.1 光学像质评价	12
2.1.1 分辨率法	12
2.1.2 星点法	14
2.1.3 点列图	14
2.1.4 光学传递函数	15
2.2 振动条件下光学像质分析	17
2.2.1 相机在轨运动分析	17
2.2.2 高光谱相机在轨运动分析	21
2.3 微振动环境下的光学性能仿真	25
2.3.1 空间成像相机微振动影响仿真	25
2.3.2 空间高光谱相机微振动影响仿真	27
2.4 小结	28
参考文献	29
第 3 章 振源特性分析	30
3.1 微振动源	30
3.2 微振动产生机理	30
3.2.1 转子不平衡	30
3.2.2 轴系不对中	32
3.2.3 转子碰摩	35
3.2.4 基础松动	38
3.2.5 轴承分析	40

3.3 典型微振动源特性及建模技术	43
3.3.1 飞轮	43
3.3.2 力矩陀螺	44
3.3.3 驱动机构	46
3.3.4 压缩机	47
3.3.5 扫描机构	49
3.3.6 太阳翼的挠性振动	54
3.4 小结	55
参考文献	56
第4章 微振动仿真分析	58
4.1 微振动仿真系统构成	58
4.2 结构平台建模	60
4.2.1 结构平台建模内容	60
4.2.2 提高模态分析准确性的手段	61
4.3 太阳翼等卫星展开附件建模	62
4.3.1 太阳翼建模内容	62
4.3.2 模型性能对比验证	62
4.4 微振动多体动力学建模	66
4.4.1 多体动力学建模内容	66
4.4.2 多体动力学中的问题	67
4.5 微振动仿真分析方法及流程	67
4.5.1 分析方法与流程	67
4.5.2 带控制系统的微振动仿真分析案例	69
4.5.3 微振动环境预示案例	71
4.6 小结	82
参考文献	83
第5章 微振动振源抑制设计	85
5.1 动力吸振器的原理	85
5.2 动力吸振器参数设计	87
5.2.1 李雅普诺夫法最优吸振器参数设计	87
5.2.2 基于多变异位自适应遗传算法的最优吸振器参数设计	89
5.2.3 动力吸振器最优参数表达式	96
5.3 吸振器结构设计实例	103
5.3.1 实验平台设计	105
5.3.2 吸振器结构设计	105
5.3.3 弹簧设计	107

5.3.4 动力吸振器振动控制实验	109
5.4 变频动力吸振技术	111
5.4.1 变频动力吸振器的分类	111
5.4.2 变频动力吸振器的减振原理	115
5.4.3 变频动力吸振器设计实例	120
5.5 颗粒阻尼减振技术	124
5.5.1 颗粒阻尼减振原理	124
5.5.2 颗粒阻尼减振试验	125
5.6 小结	131
参考文献	132
第6章 敏感载荷微振动被动隔振设计	135
6.1 被动隔振系统设计	135
6.1.1 隔振系统组成及工作原理	135
6.1.2 隔振系统设计关注的事项	136
6.1.3 隔振系统固有频率分析	137
6.1.4 隔振系统耦合度分析	139
6.1.5 弹性元件刚度影响分析	139
6.1.6 隔振器放置形式分析	142
6.1.7 隔振系统主要参数分析	144
6.1.8 隔振系统仿真分析	150
6.2 隔振器刚度设计	158
6.2.1 螺旋弹簧隔振器设计	158
6.2.2 花纹弹簧隔振器设计	164
6.2.3 横槽弹簧隔振器设计	167
6.3 隔振器阻尼设计	169
6.3.1 哈勃望远镜液体阻尼隔振器	170
6.3.2 三参数液体阻尼隔振器设计	171
6.3.3 阻尼可调式液阻设计	175
6.4 隔振效果评估	177
6.4.1 振动传递率	177
6.4.2 振级落差	178
6.4.3 功率流指标	178
6.5 隔振系统试验	179
6.5.1 隔振器刚度试验	179
6.5.2 隔振器蠕变试验	179
6.5.3 隔振系统模态试验	180

6.5.4 隔振系统减振试验	180
6.5.5 隔振系统解锁试验	181
6.5.6 隔振系统整星级试验	181
6.6 小结	182
参考文献	183
第7章 敏感载荷微振动主动隔振设计	184
7.1 微振动主动控制技术研究状况	184
7.1.1 Hexapod 平台作动器研究现状	185
7.1.2 Hexapod 平台控制器研究现状	187
7.2 Hexapod 平台设计	188
7.2.1 Hexapod 平台尺寸参数设计	189
7.2.2 Hexapod 平台作动器选择	192
7.2.3 Hexapod 平台铰链设计	195
7.2.4 Hexapod 平台作动腿设计	197
7.2.5 Hexapod 平台控制系统选择	197
7.3 Hexapod 平台仿真分析	199
7.3.1 Hexapod 平台数学模型	199
7.3.2 Hexapod 平台数学模型验证	202
7.3.3 Hexapod 平台微振动控制效果验证	205
7.4 小结	217
参考文献	218
第8章 挠性附件错频设计	220
8.1 挠性附件常见的抑制方法	220
8.2 悬臂梁绳索模型的分析	226
8.3 大挠性附件绳索增频设计实例	229
8.3.1 设计需求	229
8.3.2 仿真分析	230
8.3.3 具体设计	231
8.3.4 试验设计	232
8.4 小结	233
参考文献	234
第9章 微振动测量与试验技术	235
9.1 地面微振动试验	235
9.1.1 概述	235
9.1.2 国外对地面微振动的研究现状	238

9.1.3 微振动低噪声环境	241
9.1.4 微振动失重环境模拟	242
9.1.5 微振动激励源	248
9.1.6 地面微振动测量系统	250
9.2 微振动信号处理	256
9.2.1 信号预处理	256
9.2.2 信号处理	260
9.3 微振动在轨试验	272
9.3.1 在轨微振动测量系统设计	272
9.3.2 在轨测量及数据应用	275
9.3.3 在轨模态辨识	277
9.4 小结	281
参考文献	282

第1章 绪 论

1.1 微振动的概念与内涵

微振动（国外研究机构称之为 jitter 或 micro - vibration）是指航天器在轨运行期间，主要由转动部件（如动量轮等高速转动部件、太阳电池阵驱动机构等步进部件、相机摆镜等摆动部件等）正常工作造成的航天器幅度较小的往复运动或振荡。

以加速度的幅值及对应的频段，可以将微振动分为 3 类：

1) 准稳态加速度：频率不大于 0.01 Hz 的低频加速度。准稳态加速度的量值一般不超过 $10^{-4} g$ 量级；产生准稳态加速度的力包括大气阻力、潮汐力、太阳辐射压等与航天器绕地飞行有关的外部作用力。

2) 瞬变加速度：发生跳变（jitter）的加速度，瞬变加速度为宽频段振动，其量值一般在 $10^{-4} g$ 以上，持续时间从 $10^{-2} \sim 10^2 s$ 不等；产生瞬变加速度的力包括变轨和调姿的推力、航天器辅助设备和有效载荷动作、航天员活动等。

3) 振动加速度：表现为稳态正弦响应、随机涨落或衰减振荡的加速度，其量值（一般在 $10^{-6} g$ 以上）和频谱（0.1~100 Hz）因干扰源及航天器结构而异；振动加速度来自仪器设备的振动干扰及各种扰动因素引起的航天器结构的动力学响应。

准稳态加速度由于其极低的频率和极小的量值，对航天器有效载荷及微重力科学实验的影响一般可以忽略。本书所关注的主要是瞬变加速度和振动加速度，它们被统称为微振动加速度，与之相关的特性、传递、抑制等一系列问题即为本书重点研究的微振动问题。

航天器常见的微振动扰动源如表 1-1 所示。

表 1-1 航天器典型微振动扰动源

扰动	频率	描述
飞轮	中/高	包含一系列转速的谐波扰动
推力器	低/中/高	开启或关闭产生类似脉冲或阶跃扰动
液体晃动	低/中	推进剂或制冷剂晃动引起航天器运动
液体流动	低/中/高	液体流动和阀门操作
伺服机构	低/中/高	驱动电机扰动
磁带机	低/中/高	工作中机械运动
陀螺	中/高	转动部件不平衡引起谐波扰动
载荷内部振源	低/中	制冷机机械运动
传感器噪声	低/中/高	带宽和分辨率限制、电子噪声等
挠性附件振动	低	极易与扫描机构发生低频耦合振荡

分析表 1-1 中典型的航天器振源特性, 可以看到微振动主要有以下特点:

1) 幅值小: 微振动量级很小, 一般微振动量级在 $10^{-3} g$, 对应的位移大约在微米量级。因此, 微振动一般不会带来结构动/静强度的问题。但是, 弱量级的动态位移或应变往往使得结构材料内部的摩擦作用无法正常发挥, 其阻尼效应低于宏观振动, 而且与应变量级相关, 有时候甚至可能成为一个重要的非线性因素, 造成采用传统方法进行微振动环境下的结构参数设计和仿真分析可信度较差。如图 1-1 所示, 在幅值逐渐减小的情况下, 金属材料和橡胶材料的刚度、阻尼特性发生了变化, 从中可以看到明显的非线性现象。

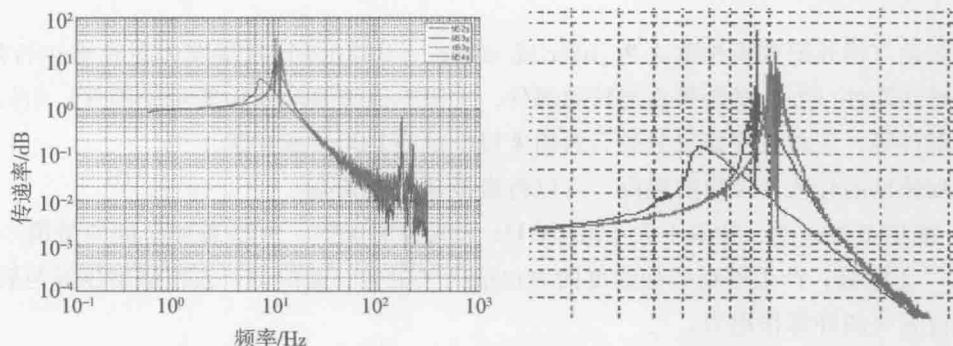


图 1-1 不同幅值的微振动对材料刚度、阻尼特性影响 (右图为局部放大)

2) 频谱宽: 微振动的频率范围很宽, 可以从 0.01 Hz 到几 kHz。低频部分可以通过姿轨控系统进行抑制, 高频部分能量较小, 产生的影响也较小, 因此微振动控制主要研究从姿轨控系统带宽到有效载荷的敏感上限。从图 1-2 所示的某压缩机的频谱特性中, 可以看到 2 000 Hz 范围内存在多个倍频、分频。

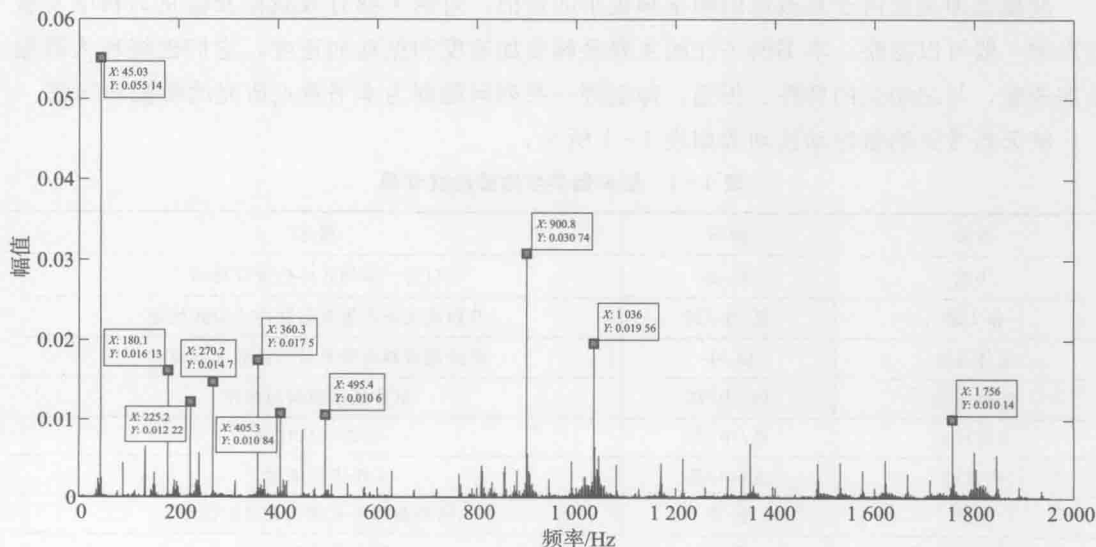


图 1-2 某红外探测仪制冷压缩机干扰频谱

3) 固有性: 微振动是由于干扰源正常工作引起的, 而非故障造成, 譬如飞轮、压缩机等, 其正常工作时即产生微振动, 因此不可能消除, 是其固有特性。如图 1-3 所示为典型飞轮的振动频谱, 振源产生的激励将在随后的章节中讨论。

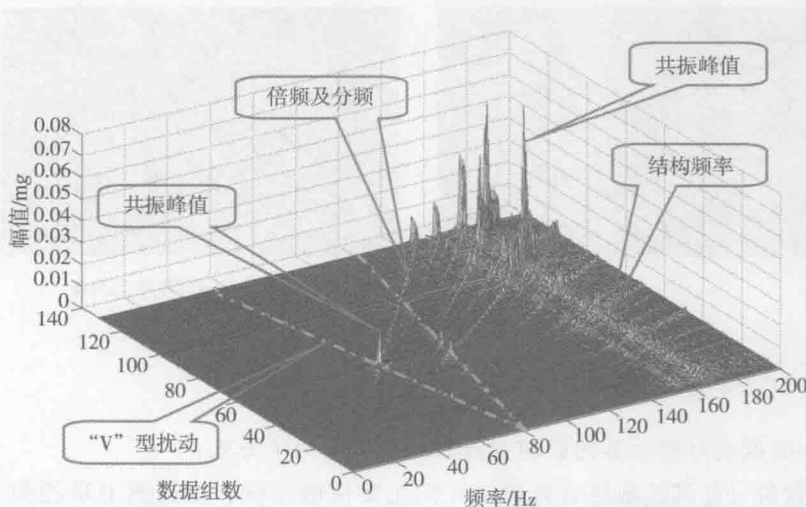


图 1-3 飞轮典型的振动频谱

4) 难测量: 由于微振动量级较小, 与地面环境噪声水平相当, 甚至更小, 地面环境噪声会对信号产生比较大的影响。另外, 传统的测量设备往往精度较低, 难以实现对微振动信号的有效测量, 因此必须采用高灵敏度、高分辨率的微振动信号测量系统, 配以超静的试验环境实现地面和模拟在轨的微振动测量。如图 1-4 所示为普通试验厂房的背景噪声以及电话铃声 (6 个峰) 的振动幅值, 可以看出其幅值已超过微振动量级。

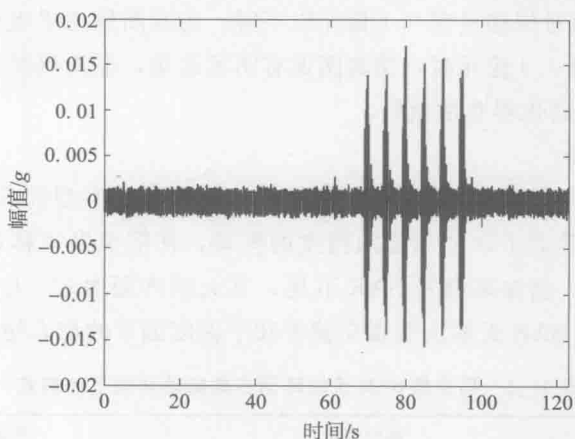


图 1-4 试验环境背景噪声及电话铃声引发的振动噪声

5) 难抑制: 微振动幅值小、频带宽, 且难以测量, 因此给控制带来了很大的困难。

6) 选择性: 所谓干扰选择性是指星上光学类成像、高分辨率合成孔径雷达成像、干

涉类成像、激光通信以及重力梯度测量等相关的高精度载荷自身精度和灵敏度越高,对微振动也就越敏感。因此,随着分辨率的提高,对微振动环境的要求也越来越严格。图 1-5 为在微振动的干扰下,图像像质严重下降。

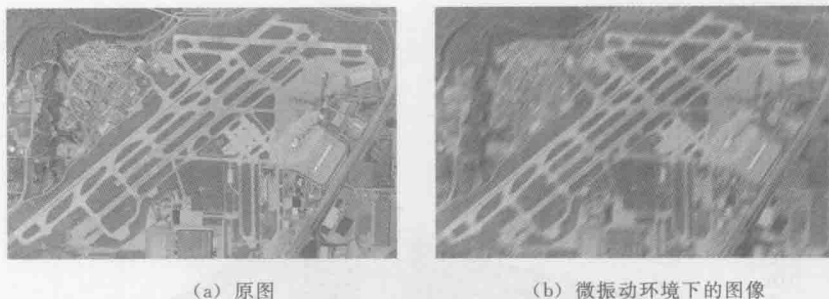


图 1-5 微振动对图像的影响

1.2 微振动的主要影响

总体上,微振动对航天器的影响主要表现在以下两个方面:

- 1) 有效载荷(尤其是敏感有效载荷)的主要性能指标,如遥感卫星图像质量、激光通信卫星的指向和对准精度等;
- 2) 与轨道微重力环境相关的科学实验,如重力梯度测量,空间站上进行的生物和材料实验等。

具体来说:

(1) 光学成像类卫星

对于光学成像载荷,像元级的微振动量级会对图像产生较大影响,光学传递函数(MTF)急速下降,因此一般要求把卫星平台的微振动量级控制在图像的亚像元级。

当微振动引起的相对像移量在 0.1 像元以下时,仿真图像结果表明图像质量几乎无变化;当相对像移量达到 0.3 像元时,仿真图像有明显退化,但尚可接受;当相对像移量在 0.5 像元时,仿真图像退化得非常模糊。

(2) SAR 成像设备

对于 SAR 卫星,一般由多块 SAR 天线板在轨展开形成大型的 SAR 天线阵面,微振动能够诱发 SAR 天线阵面平面度和指向精度的振动,使图像发生移动,从而影响图像的质量,如图 1-6 所示。例如某型号 SAR 卫星,其天线阵面由左、中、右三块 SAR 天线组成,在飞轮激励下,SAR 天线法线指向偏差和平面度偏差的仿真结果如表 1-2 所示。

表 1-2 某卫星 SAR 天线阵面在微振动环境下的偏差

	指向偏差/ (°)	平面度误差/ μm
左 SAR 天线	0.327	9.3
中 SAR 天线	0.426	11.2
右 SAR 天线	1.140	15.7
SAR 天线整体	0.600	10.6