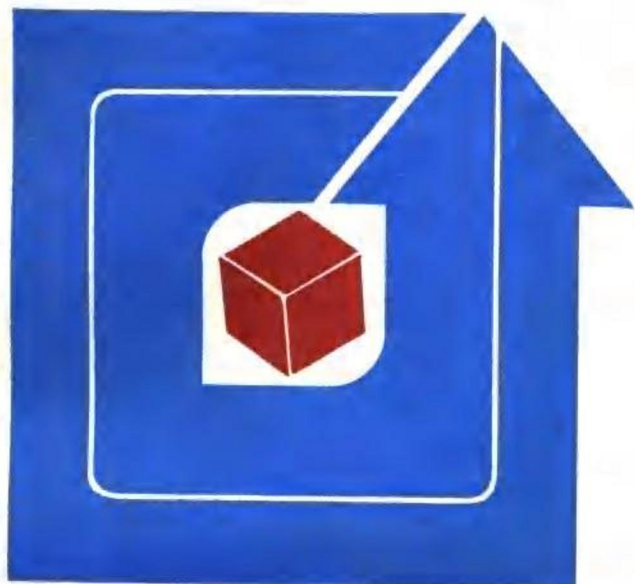




包装动力学

BAO ZHUANG DONG LI XUE

郑百哲 朱竞洪 百 瑛 编

北京科学技术出版社

内 容 提 要

本书是包装动力学的一本入门书。全书共十二章,包括概论,力学基础,包装件的力学模型,机械振动,机械冲击,缓冲包装材料,单自由度线性系统的冲击和振动,单自由度非线性系统,非线性几何结构,产品脆值理论,缓冲包装设计,包装测试。部份章后附有习题。书末有三个附录。

书中内容通俗易懂,可作为有关大专院校的教学用书,也可供广大包装科技和工程技术人员参考。

包装动力学

郑百哲 朱竞洪 百 璞 编

*

北京科学技术出版社出版

(北京西直门南顺城街12号)

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

人民教育出版社印刷厂印刷

*

787×1092 毫米 32 开本 13.375 印张 295 千字

1990年9月第一版 1990年9月第一次印刷

印数 1—1500册

ISBN 7-5304-0605-1/Z·316 定价:6.80元

前 言

包装动力学是一门涉及力学、数学、材料科学、环境试验与电测技术、包装设计以及计算机技术的新兴综合学科,它是缓冲防振包装技术的理论基础。

商品在流通过程中受到的冲击是复杂的,遇到的振动一般是非线性的和随机的。本书并未深入探讨非线性振动和随机振动,而主要用较简单的微积分和微分方程等数学工具及振动、冲击方面的力学知识来进行分析研究。

全书共分十二章,第一章概论,第二章力学基础,第三章包装件的力学模型,第四章机械振动,第五章机械冲击,第六章缓冲包装材料,第七章单自由度线性系统的冲击和振动,第八章单自由度非线性系统,第九章非线性几何结构,第十章产品脆值理论,第十一章缓冲包装设计,第十二章包装测试。书末有三个附录,附录一是本书符号汇总,附录二是缓冲包装设计方法等新颁布的有关五项国家包装标准,附录三是作者与人合著的《包装缓冲材料的静态和动态缓冲系数》。最后是参考文献。

本书主编为郑百哲教授,参加编写的还有高级工程师百瑛(第二章),高级工程师朱竞洪(第十二章)和郑小林。

序

包装动力学是一门涉及力学、工程振动、包装材料、包装测试和包装设计的新兴边缘学科。它是运输包装缓冲防震设计的理论基础。

自从美国 R. D. Mindlin 于 1945 年发表开创性的《缓冲包装动力学》一文以来,防震包装技术方法、包装缓冲材料和运输包装测试设备等方面都有了很大的发展。美、日、英、德等发达国家包装工业的产值约占各自国民生产总值的 2%,而包装行业中技术人员占其本行业总职工的 20% 以上,这两个百分比有力地说明了包装工业和包装技术人员在整个国家经济中的重要地位。

我国近十年来由于改革开放政策和商品经济的大发展,包装工业获得了飞速的增长。据 1989 年 8 月中国包装报载,包装骨干企业已有 6700 多家、固定资产原值 150 多亿元,职工 150 万人,1988 年包装工业产值 250 亿元,这些都是空前的发展,但是包装工业产值还只占我国工农业总产值的 1%,包装技术人员只占包装行业总职工的大约 1%,都与发达国家差距很远。据 1988 年 4 月公布的资料,因包装不善,一年的损失仍达 140 多亿元。所以,开展包装动力学的教育,扩大包装专业技术人员的数量和提高他们的素质,是迫切的任务。

为满足专业人才的需求,现在我国已建立了包装函授工

程学院,在 30 多所高校中设立了各类包装专业,还有一批中级包装技术学校,并正筹办包装工程学院。奚德昌教授等于 1987 年在杭州成立了“包装防震缓冲研究会”,已召开过两届包装动力学和包装结构设计学术会议。1989 年成立了中国振动工程学会属下的包装动力学分学会,郑百哲教授为副主任委员。郑百哲等同志在我国率先招收和指导了包装方面的研究生,开设了包装动力学等课程。

为适应我国包装技术教育的发展,郑百哲教授主编了这本《包装动力学》。考虑到目前国内包装技术人员的实际情况,本书只以理论力学和高等数学为基础,对所有公式作了详细推导,行文通俗易懂,内容联系我国包装工业的现状和实际,是一本适宜于包装专业大学、中专学生的入门教材,也是广大包装技术人员的有益的参考书。

胡海昌

1989 年 11 月

目 录

第一章 概论	1
§ 1.1 包装的概念和定义	1
§ 1.2 缓冲防振包装	1
§ 1.3 包装动力学的研究对象	2
§ 1.4 破损定义、合理破损率和缓冲防振包装 的经济意义	3
§ 1.5 力学环境	6
§ 1.6 包装标准	9
§ 1.7 缓冲防振包装理论发展简史	9
第二章 力学基础	12
§ 2.1 质系重心	12
§ 2.2 点的运动学	25
§ 2.3 刚体基本运动	28
§ 2.4 动力学基本方程	30
§ 2.5 动量定理	32
§ 2.6 动量矩定理	41
§ 2.7 功能原理	44
§ 2.8 达朗伯(D'Alembert)原理	48
习题	50
第三章 包装件的力学模型	53
§ 3.1 无阻尼单自由度线性系统	53

§ 3.2	粘性阻尼单自由度线性系统	53
§ 3.3	计及外箱质量的包装件模型	54
§ 3.4	考虑易损部件的二自由度包装系统模型	54
§ 3.5	外箱很重的包装件的力学模型	55
§ 3.6	产品触底的包装系统模型	56
§ 3.7	有间隙的包装系统模型	56
§ 3.8	多自由度包装系统模型	57
§ 3.9	非线性包装系统	58
第四章	机械振动	59
§ 4.1	振动概述	59
§ 4.2	单自由度系统的自由振动	61
§ 4.3	缓冲垫的串联和并联	73
§ 4.4	有阻尼自由振动	77
§ 4.5	强迫振动	92
第五章	机械冲击	121
§ 5.1	冲击概念	121
§ 5.2	冲量定理	123
§ 5.3	恢复系数	125
§ 5.4	速度增量、冲击参数	127
§ 5.5	冲击过程的动能损失	129
§ 5.6	冲击放大系数与易损关键部件	133
§ 5.7	水平冲击	139
第六章	缓冲包装材料	140
6.1	线弹性材料	141
6.2	非线性弹性材料	143
6.3	非线性弹性系统	148
第七章	单自由度线性系统的冲击和振动	153

§ 7.1	单自由度系统运动方程·····	153
§ 7.2	单自由度线性系统最大加速度和最大位移·····	160
§ 7.3	单自由度线性系统自由振动加速度—时间 关系·····	164
§ 7.4	包装件的反弹·····	174
§ 7.5	阻尼对加速度的影响·····	183
§ 7.6	摩擦对加速度的影响·····	191
第八章	单自由度非线性系统·····	196
§ 8.1	正切型缓冲材料·····	196
§ 8.2	双曲型正切弹性材料·····	207
§ 8.3	不规则弹性材料·····	217
第九章	非线性几何结构·····	229
§ 9.1	双线性结构·····	229
§ 9.2	弹簧吊装·····	241
第十章	产品脆值理论·····	261
§ 10.1	产品脆值概念·····	261
§ 10.2	冲击脉冲形状的影响·····	263
§ 10.3	破损边界曲线·····	267
§ 10.4	典型产品脆值·····	272
第十一章	缓冲包装设计·····	274
§ 11.1	缓冲包装设计程序·····	274
§ 11.2	缓冲效率、缓冲系数·····	283
§ 11.3	缓冲垫厚度和面积计算·····	299
	习题·····	302
第十二章	包装测试·····	305
§ 12.1	包装件及缓冲材料的力学试验·····	306
§ 12.2	包装的力学试验设备及测试系统·····	331

§ 12.3 计算机技术在包装测试及其它方面的应用···	348
附录 一、符号汇总·····	350
二、缓冲包装设计方法等五项国家包装标准·····	355
三、包装缓冲材料的静态和动态缓冲系数·····	401
参考文献·····	418

第一章 概 论

§ 1.1 包装的概念和定义

包装的概念是伴随着产品作为商品而产生的。由于近代科学技术的飞速发展,包装越来越改进且为商品所必需,并形成了独立的工业体系,同时,包装技术也成为专门的工程科学。

包装的主要作用是:① 保护商品;② 便于运输和贮存;③ 促进销售。

包装可分为:① 运输包装;② 销售包装。

美国与加拿大等国及多次国际会议对包装有过定义,但国际间尚未统一。

运输包装定义:运输包装是在商品的运输和贮存过程中应用某种适宜的材料和容器保护其价值与状态的技术措施。

运输包装又可包括:① 缓冲防振包装;② 防水包装;③ 防潮包装;④ 防霉包装;⑤ 防锈包装;⑥ 防蛀包装,等等。

§ 1.2 缓冲防振包装

关于缓冲防振包装可作如下定义:为保护商品在流通过程中不因受到的机械冲击和振动而破损所施行的包装,称为缓冲防振包装。

§ 1.3 包装动力学的研究对象

1. 包装动力学 是分析研究流通过程中的机械冲击与振动在商品上产生的响应和采取相应包装措施的一门科学,它的主要研究对象就是商品的缓冲防振包装。

2. 引起商品破损的主要因素 是运输环境中的机械冲击和振动为其外因,产品本身的强度低为其内因。

缓冲防振包装的作用就是要减小冲击和振动的传递率,以使传递到商品上的冲击和振动在产品所能承受的范围内。因此,包装动力学主要研究以下四点:

(1) 在产品流通过程中的冲击和振动的环境条件,这是造成产品机械性破损的外因。

(2) 产品自身的强度,也就是承受冲击和振动的能力,这是产品是否发生机械性破损的内因。

(3) 用于缓冲和隔振的衬垫材料的动力学特性。

(4) 由产品、衬垫材料及包装容器等构成的系统在冲击和振动激励下的响应,以及产品本身各部件间的相互影响和作用。

从造成产品破损的力学环境因素看,主要是:① 压力;② 振动;③ 冲击。包装力学研究以上三方面问题,而包装动力学则主要研究冲击和振动。

为了对产品提供合理的冲击防护,必须充分了解:① 流通过程中的冲击强度;② 产品脆值;③ 缓冲材料的能量吸收特性和其它种种动、静态特性。目前国内外主要都是从能量观点来分析研究缓冲机理和进行缓冲设计。

为了对产品提供振动防护,必须充分了解:① 流通过程

中产品可能受到的振动激励;② 产品的固有频率;③ 缓冲材料的振动传递特性。关于防振机理的分析研究,主要是应用机械领域中相当成熟的振动理论。

我们应当以包装动力学为理论基础来指导以下三项工作:

- (1) 包装的缓冲防振设计;
- (2) 制订有关缓冲防振和运输条件的包装标准;
- (3) 包装测试。

§ 1.4 破损定义、合理破损率和缓冲防振包装的经济意义

1. 破损定义 破损是一个模糊概念。究竟怎样算是破损了呢?能否量化?有无标准呢?

灯泡破了,固然算破损,灯丝断了,灯泡不亮了,就是说丧失了使用能力,也是破损。所以破损可定义为:丧失了合格品质量指标之一的就叫破损。

任何一种产品,都有它特有的合格质量指标。出厂前的质量检验是按一定质量指标进行的,用户也是按与厂方事前达成的产品质量标准的协议来验收的。因此,要计算破损率就要赋予破损一个标准和定义。这个标准就只能是对某种等级的特定产品预先规定的质量指标。满足这些指标的产品是合格产品。本来合格的产品由于运输、装卸和贮存而不能再达到这些指标时就定义为破损。

由于损坏的性质和程度的不同,破损可分为以下三种,

(1) 失效 指产品已经丧失使用功能而且不可逆转,即不可恢复,这是严重破损;

(2) 失灵 指产品功能虽已丧失,但可以修复,这是轻微破损;

(3) 商业性破损 主要指不影响产品使用功能而仅在外观上造成的破损。虽可使用,但也降低商品的价值。

2. 合理破损率 要根据对产品破损率的要求进行产品的包装设计。有的产品,如极重要的军用品、政治意义很大的极贵重的礼品,以及危险性很大的危险品等,可靠性要求100%,即破损率为零,对这类产品的包装是不惜成本的。

但是,对任何产品都提出百分之百的可靠性要求是不合理的,因为这样会大大提高包装、运输费用。其提高的程度,超过了某个破损率下产品破损的费用。

因此,对绝大多数产品来说,是允许有一定的破损率的。在经济上,不同的产品有不同的合理破损率,它取决于多种因素,但主要是经济的因素,即所谓合理的破损率,就是经济上最合理的破损率。所以,破损率当然以小为好,但并非越小越好,更不应要求每种产品破损率都为零。

3. 缓冲防振包装的经济意义 上面虽然讲了允许有一个合理的破损率,但就我国总的现状来说,目前首要的并非过份包装,而是包装不足,即破损率太高。据1987年报载,全国因包装不善在供、运、销售过程中造成的经济损失高达140多亿元。

近十年来我国的包装工业取得了很大的发展。全国包装工业的产值已由1980年的72亿元(占整个国民经济的1.1%)上升到1986年的165亿元,每年平均递增14.8%。根据国务院办公厅1986年2月24日颁发的国办发(1986)13号通知,1986—2000年全国包装工业发展纲要计划到本世纪末将发展到432亿元。改进包装有重大的经济效益,从1984年到

1986 年三年内减损增收约为 25 亿多元，其中出口商品包装减损 8.2 亿元。下面举几例说明：

(1) 陶瓷制品 ① 1983 年，年产 37.8 亿件，改善包装之前破损率为 15—18%，达 5.67 亿件，折合人民币 1.7 亿元，改善包装后破损率降到 3%。② 1983 年陕西临泾文物复制厂改进秦俑包装，由纸箱垫纸花改为聚氨酯发泡塑料包装，破损率降到 3% 以下。

(2) 搪瓷制品 1983 年的产品为 14.1 万吨，改进包装前破损率为 5—6%，达 0.71 万吨，折合人民币 1500 万元，改善包装后破损率降到 1.2%。

(3) 电子产品(仪器、仪表) ① 改进包装之前用的是木箱，破损率为 0.5%，电子管每年平均破损 2.8 万只，改善包装后用集装箱，周转箱、双瓦楞纸箱、钙塑箱，内衬缓冲衬垫，基本无破损，特别是对于价格昂贵的异形产品，采用聚氨酯瞬间发泡成型材料，杜绝了破损现象。② 1984 年陕西 4400 厂把 14 吋彩色显像管包装由纸质内托架改为聚苯乙烯发泡塑料托架，使管屏面擦伤率由 6% 下降到 2% 以下。③ TM-87 大功率电子管过去用弹簧吊装，有时全部破损，现改进包装设计后基本上无破损。④ 1984 年安徽合肥灯泡厂的大功率溴钨灯改用塑料泡沫套作内衬，运输破损率从 15% 减少到基本无破损。

(4) 玻璃制品 改进包装前用的是木箱、麻袋、草绳、竹篓，破损率为 9%，改善包装后用集装箱、周转箱、钙塑纸箱、瓦楞纸箱、吸塑托盘、热塑膜等，破损率降到 2%。1988 年中国人民保险总公司正在全国公开开展平板玻璃包装竞赛。

(5) 上海永久牌自行车年产 280 万辆，过去用木材包装，破损率达 30—40%，每年发生索赔案 2000 多起，改为纸箱包

装后,基本无破损。

(6) 上海的三家缝纫机厂年产 200 万台,过去用草绳包装,破损率达 15—20%,改为纸箱包装后,破损率降到 0.67—1.3%,即每年减少损失 38 万台。

(7) 江苏将木箱装蛋改为塑料蛋箱和集装箱架,破损率减少一半。

由上可知,缓冲防振包装有重大经济意义,因此,国家领导非常重视,成立了包装大检查领导小组,把减少破损作为指令性指标来考核企业,这是必要的。

§ 1.5 力学环境

产品包装后,在贮存和运输过程中都受到力的作用。产生于装卸及火车、汽车、船舶、飞机运输与堆码作业中的力,其性质及危害程度不一,但可归纳为压力、冲击、振动三类。我们称之为包装的力学环境。

装卸有靠人力的,有用机械的。装卸中由于不慎跌落便使包装件受到冲击,但在这两种作业中,包装件所受到的冲击有较大差别。由一些统计资料,关于人力装卸作业中可能产生的冲击,有以下经验公式:

$$h = 300 \frac{1}{\sqrt{W}} \quad (1-1)$$

式中, h 表示跌落高度,单位为 cm; W 为包装件重量,单位为 kg。上式仅适用于 $W > 16$ kg。

由于包装件的重量及装卸方式不同,其可能产生的冲击有如下的统计资料。

表 1-1 不同的包装重量、装卸方式与跌落高度

包装重量(kg)	装卸方式	跌落高度(cm)
<10	一人装卸,能抛掷	105
10—25	一人装卸	90
25—125	二人装卸	75
125—250	用轻型起重机装卸	60
250—500	用中型起重机装卸	45
>500	用重型起重机装卸	30

表 1-2 不同的包装重量、最大尺寸与跌落高度

包装重量 (kg)	最大尺寸 (cm)	跌落高度(cm)			说 明
		I	II	III	
<25	<90	90	70	40	I—适用于转运次数多和预计 装卸条件较差情况 II—适用于转运 1—2 次和预 计装卸条件不很好情况 III—适用于直达和预计用机械 装卸情况
25—50	90—120	60	50	30	
50—75	120—150	50	40	20	
75—100	>150	40	30	10	

火车在正常运行时，其冲击及振动加速度值不大。但在某些情况下，如列车在挂钩撞合时，可能产生 2—4g 的冲击加速度。当速度为 14.5 km/h 时，溜放挂钩撞合瞬间可能产生高达 18 g 的冲击加速度。曾经实测过火车的振动，如正常启动，车厢地板的垂直振动加速度约在 0.05—0.12 g 之间，其主频有 5、60、87.5、110.5 Hz 等，而正常刹车时则约在 0.12—0.31 g 之间，主频有 48.5、55、81.5、145、210 Hz 等。火车过弯道、爬坡、叉道行车以及编组时，车厢地板的垂直振动加速度都较小，也在以上范围内，主频也差不多，还有低至 0.5 的。至于车厢地板的纵向及横向振动加速度及其主频则较小。以上测量频率范围为 0—500 Hz，能量集中于低频段。

汽车运输时所产生的冲击及振动，其大小与车的类型、车

速、行车状况(是否加速和刹车)以及路面状态等有关。曾经实测,解放牌载重汽车分别以每小时 15、20、25、30、35、40、45 公里速度在石子路、级配路(中级路面)、柏油路、水泥路行驶时,车厢地板的垂直振动加速度由大变小。例如以 30 km/h 在石子路上行驶,其车厢地板的垂直振动加速度约为 0.76 g,而在级配路上行驶时则为 0.47 g、在柏油路及水泥路上行驶时约为 0.28 g。又如不同的车型以 40 km/h 速度行驶于级配路时,解放牌载重汽车车厢地板垂直振动加速度为 0.72 g,而 SKODA 型载重汽车则为 1.02 g。在石子路以 20 km/h 速度行驶时,解放牌汽车为 0.66 g,SKODA 载重汽车则为 1.02 g。在同一汽车厢地板上,垂直振动加速度比横向与纵向的振动加速度大,刹车时纵向振动加速度增大但仍小于垂直方向的。以上实测的频率范围为 0—500 Hz,主频为 2Hz 及 7Hz,振动能量集中于低频段,约有 70% 的能量集中于 1—50Hz,在 1—20 Hz 范围尤为突出,200 Hz 以上的能量相当微弱。

船舶在航行时有摇摆及振动,其大小与海情(或河流的水流、风浪等)、船型及动力源有关。实际上,摇摆是极低频率的振动,其周期约 0.5 至 15 秒左右,加速度一般在 0.3 g 以下,远洋轮遇恶劣海情时可达 2g。大型货轮的摇晃有达 30 度倾角的。动力源(包括螺旋桨)引起的振动频率为 2—20 Hz。

飞机运输时所产生的冲击及振动,其大小与机型、飞行状态(起飞、爬升、巡航、着陆、滑跑)、气流状况等有关。运输机货舱处的垂直方向振动加速度一般在 1—1.5 g,横向振动加速度为 0.2—0.5 g。振动频率一般为 5—200 Hz,其主频与发动机转速有关。着陆时有较大冲击,垂直方向一般有 1—3 g 的冲击加速度。