

● 高等院校试用教材 ●

HUANCHONGBAOZHUANGDONGLIXUE

缓冲包装动力学

彭国勋 王瑞栋 郭延洪 编



湖南大学出版社

内 容 提 要

本书阐述了缓冲包装设计有关的动力学基本理论和分析方法。全书共有十章。第一章介绍包装动力学研究的对象、发展和内容。第二章介绍包装动力学的某些基本概念。第三章研究了单自由度、两自由度和多自由度线性系统的振动理论基础。第四章对随机振动的内容做了简明的阐述。第五章至第十章全面研究了缓冲包装动力学有关的流动环境条件、易损度、缓冲材料特性、缓冲包装系统分析、缓冲包装设计和试验等重要内容。因此,这是一本比较全面而系统地介绍缓冲包装动力学的著作,内容丰富,实用性强,可作为包装、储运等专业的教材,也可供各企业有关科技与管理人员进行包装设计或管理时参考。

缓冲包装动力学

彭国勋 王瑞栋 郭延洪 编

责任编辑 左宗仰

☆

湖南大学出版社出版发行

(长沙市岳麓山)

湖南省新华书店经销 湖南大学印刷厂印刷

☆

187×1092毫米 16开 13.75印张 318千字

1989年10月第1版 1989年10月第1次印刷

印数: 1—6000册

ISBN 7-314-00460-9/TS·6

定价: 2.80元

前 言

人类进行包装活动的历史虽然很久，甚至可以追溯到人类产生之初，但包装实际上形成行业的时间却并不长。尤其是作为现代包装行业，还是在世界工业革命之后。世界资本主义兴起并将电子、化工、机械、生物工程、能源开发等现代科技应用于开发商品新包装，是自二十世纪三十年代开始的。所以说现代包装工业的历史，最多也只有半个世纪。

美国密执根州立大学农学院，在1952年开设包装课，是世界上第一个正式将包装列入高等教育的学校。而到现在也只有三十五年历史。当今世界，随着现代商品经济高速发展，大量涌现于市场的一切新商品，都需要有适时的新包装。这就必须促使现代包装工业以与资本主义商品经济同样的高速度相应发展。

我国的现代包装工业，自进入二十世纪七十年代末期，经过几年的调整、准备之后，于八十年代初开始迅速发展。但由于起步晚、基础薄弱、工程技术人才和管理人才极端缺乏，所以大大落后于世界先进水平。中央领导同志早在1983年就指示：要定向培养这方面的人才。在中央领导和中国包装协会、包装总公司及国务院有关部委、各省、市包装协会的直接领导和大力支持下，我国的包装教育，自1984年以来，有了较大的发展。据不完全统计，至1986年底，我国已有近四十所高等院校（其中包括部分设有包装装潢设计专业的美术院校）和三十多所上等学校，开办了包装工程专业或开设包装技术课；1985年，中国包装协会经国家经委批准，创办了“中国包装工程函授学院”和“包装装潢设计刊授大学”；1986年国家教育委员会正式批准筹建“中国包装工程学院”。

由于高速发展起来的我国包装教育，急需适合我国国情的各种层次的包装教材，为此，中国包协教育委员会和中国包装总公司教育培训部，在国家教育委员会“教材办公室”的指导下，经过一年半的筹备，推选出三十六名热心于包装教育的专家、学者和工程技术人员，于1984年成立了“全国包装教材编审委员会”，并分成十四个编写组，负责编写十二门高校和六门中等专业学校的包装教材。

这第一部分包装教材包括：包装概论、包装材料与成型加工（包括纸、塑料、金属四个分册）、包装用辅助材料、包装工程机械、包装测试、包装系统控制、包装技术与方法、包装设计、包装管理、包装力学、包装印刷概论等共十二门，基本上能够满足1984年原教育部批准的《包装工程》试办专业规定内容和培养目标的要求。这部分教材的编写，基本上可以满足我国大量开展起来的包装教育对教材的急需，也填补了我国边缘学科教材建设中一个方面的空白，并将对国内外包装教育事业的发展，起到积极的作用。所以说，这是一项具有国际影响和一定历史意义的工作。

全国包装教材编审委员会为解决急需而组织编写的这套包装教材，各课程组克服种种困难，做了大量调研和资料搜集工作，力求打破过去编写教材的老框框，尽量做到理

论研究与新技术应用相结合。在根据我国国情，对国内外资料的引用和内容的编排上，较其它教材具有一定的开拓、创新精神。关于“教学时数”，本教材只拟了一个“参考时数”，而且有意使教材内容量多于“参考时数”，以供不同专业方向的各类院校有较大的选用余地。

现代包装是跨行业、跨部门、多种学科互相渗透的边缘学科。尤其是随着现代科学技术的高速发展，包装新材料、新设备、新技术日新月异。更兼现代包装是新兴工业，所涉及的学科领域极广，而编写教材可资借鉴的资料又极少。所以尽管参加编写本教材的专家学者们，在编写过程中，尽了最大努力搜集和参阅大量国内外最新包装科技资料，并尽可能结合我国国情和生产实践进行编写。但作为开创性的第一套教材，在内容上的某些疏漏，甚至错误在所难免，敬请各有关方面多提宝贵意见，以使其不断充实、完善。

希望在各方面的大力支持与帮助下，我国的包装教材建设取得更大成果，并促使我国的包装教育，能在不长的时间里，跨入世界先进行列。

全国包装教材编审委员会

1987年9月

编写说明

随着我国社会主义商品经济的发展,为了提高国民经济的效益,减少由于包装不善引起的每年上百亿元的重大损失,最近一段时期,从中央到地方,各行各业都在采取措施,力争把经济损失降低到最小程度。解决这一难题的根本出路在于科学技术进步,缓冲包装动力学就是与之有关的科学技术分支之一。为了推广和应用这种在我国比较陌生而又十分重要的科学知识,中国包装技术协会组织的包装教材编审委员会把《缓冲包装动力学》列为首批编写的统编教材之一,作为包装、储运或相关专业的必修课或选修课教材。

这门课程涉及的内容理论性较强,又与包装设计和技术关系密切,因此,在内容安排上,既照顾系统性,又考虑实用性。力求把国内外近三、四十年的包装动力学研究成果全面而系统地介绍给读者。美、日等国虽然在80年代出版过包装动力学专著,但结合我国实际,在国内尚无同类参考书的前提下,消化和综合国外的成熟技术和理论,反映最新发展动向,向广大读者展现这一研究领域的全貌,是作者一时难以如愿的。尤其是在急于为在校学生提供教材的情况下,由于时间有限,内容取捨,前后衔接,难免有推敲不细之处,请读者批评指正,以便今后再版时修正。

全书共十章。前四章为理论基础,是理论力学和振动理论有关内容与包装设计相结合的基础部分;后六章为与缓冲包装设计关系更密切的专业部分。两部分互相呼应,可以分开处理。这种安排有利于大学生和在职工程技术人员自学需要。

本书第一、三、四章由西北轻工业学院彭国勋编写,第二、五章由郭延洪编写,后五章由渝州大学王瑞栋编写,全书由彭国勋教授统稿,并担任主编。主审为西北轻工业学院的陈新之副教授。在编写过程中,曾得到陈满儒、张华良等同志的帮助,谨表谢意。

编 者

1988年12月

目 录

第一章 绪论	(1)
第一节 包装动力学研究的对象.....	(1)
第二节 包装动力学的发展.....	(2)
第三节 包装动力学课程的内容和地位.....	(5)
第二章 包装力学与流变学的基本概念	(7)
第一节 包装力学概念.....	(7)
第二节 包装流变学概念.....	(17)
第三章 振动理论基础	(24)
第一节 单自由度线性系统的振动.....	(24)
第二节 两自由度线性系统的振动.....	(40)
第三节 多自由度线性系统的振动.....	(51)
第四章 随机振动引论	(58)
第一节 随机过程理论基础.....	(58)
第二节 随机过程的频域分析.....	(66)
第三节 包装系统对随机激励的响应.....	(73)
第五章 包装件的流通环境条件	(79)
第一节 引言.....	(79)
第二节 流通环境的冲击特性.....	(82)
第三节 流通环境的振动特性.....	(85)
第四节 流通环境的压缩特性.....	(90)
第五节 流通过程的气象条件.....	(91)
第六节 环境条件标准化.....	(94)
第六章 脆值及其评价方法	(100)
第一节 脆值概念.....	(100)
第二节 评价脆值的边界条件理论.....	(103)
第三节 评价脆值的试验方法.....	(110)
第四节 评价脆值的经验估算方法.....	(116)
第七章 缓冲包装材料的动力特性	(119)
第一节 缓冲材料基本分类.....	(119)
第二节 缓冲材料的弹性特性.....	(120)
第三节 弹性系数.....	(122)
第四节 组合材料的弹性系数.....	(126)
第五节 缓冲特性与缓冲系数.....	(129)
第六节 确定缓冲系数的静态实验方法.....	(131)
第七节 确定缓冲系数的动态试验方法.....	(132)

第八节	影响缓冲系数的因素	(135)
第九节	阻尼与抗振特性	(136)
第十节	回弹性	(137)
第十一节	抗蠕变性	(138)
第十二节	对缓冲材料的全面评价	(138)
第八章	缓冲包装系统	(140)
第一节	冲击的一般特性	(140)
第二节	线型弹性体的缓冲系统	(141)
第三节	非线性弹性体的缓冲系统	(145)
第四节	缓冲系统的阻尼效应	(148)
第五节	单自由度缓冲系统的受迫振动	(151)
第六节	两自由度缓冲系统的受迫振动	(154)
第七节	触底对缓冲系统的影响	(158)
第八节	包装空隙对缓冲系统的影响	(160)
第九节	包装箱重量对缓冲系统的影响	(161)
第九章	包装的缓冲与防振设计	(164)
第一节	缓冲包装的一般形式	(164)
第二节	缓冲衬垫设计	(173)
第三节	防振包装设计	(177)
第十章	包装试验	(184)
第一节	运输试验	(184)
第二节	货物试验	(194)
第三节	选择试验方法的基本原则	(208)
参考文献		(210)

第一章 绪 论

第一节 包装动力学研究的对象

自从人类开始进行生产劳动起,包装便伴随着把就地吃不完的食品搬运到洞穴中贮藏起来的需要而诞生了。史前时期,人们已学会了如何用兽皮或芦苇编织筐子完好运输食物的办法。在西安市半坡村发掘出的中国新石器时代仰韶文化遗址上可看到,先人们早在六千多年前就会用各种杯形口尖底瓶、葫芦形瓶、蒜头形壶、圆底钵、浅腹圆底盆、折腹盆、弦纹夹砂罐和绳纹瓷等陶器,贮运不同食物或生活用水。为了保证这些易碎的运输容器不致在搬运过程中损坏,他们不得不采用头顶、肩扛、人抬等方式,小心翼翼地运输。显然,这样原始的搬运方式,速度难以很快,距离不可能很长,稍不留神就会使容器损坏。

长期生产劳动的经验积累,祖先们慢慢明白了引起运输容器破坏的原因是振动冲击作用。为了防振缓冲,提高搬运速度,在公元前十一世纪的商朝末年,出现了扁担。这是世界上最早的防振缓冲工具。发明扁担的人并不懂得现代的隔振理论,一根软硬合适的棍子,就使人们能挑起东西快走如飞,被挑东西却很平稳,就连桶里的水都不会被颠簸出来。实质上,扁担与被挑物品构成了一个单自由度的减振系统^(注),把人在行走时产生的低频大振幅激振吸收了,振动基本传不到被挑物品上。扁担减振是消极隔振,即隔去的是“支座”的运动,而不是力。

中世纪以后,对物品运输能起到更好保护作用的木桶、木箱、纸箱、竹筐等运输容器相继出现。人们还学会了在物品与容器之间填充棉花、刨花、锯末、纸屑或其它松散材料的方法,进一步减少了贮运流通过程中对物品的损坏。

包装的重要作用,只是在工业革命以后,资本主义商品经济得到充分发展时,才为世人所瞩目。大批量产品生产出来之后,不仅要求在本地区销售,还要长途运输到国内外去。如何合理设计包装的结构,使商品在运输、装卸及贮藏过程中的损失减低到最低程度,是包装动力学需要研究的重要内容。

广义地讲,包装是实现商品价值和使用价值的手段,是商品生产与消费之间的桥梁。在流通过程中,包装对保护商品、美化商品、宣传商品以及对商品的贮藏、运输、销售、使用都起着重要作用。

作为包装工程学科的一个分支,包装动力学主要是研究产品在流通过程中受到静载和动载作用而破坏的机理,以及为实现有效包装所需的专门知识。

注:当扁担自重相对于所挑重量可以忽略不计时,扁担和所挑重物就可以近似看作一个单自由度的振动系统。

先进国家经济发展的经验表明,在发展生产的同时,只有重视生产环节的最后一道工序——包装,才能获得较大的经济效益。我国的许多企业对商品包装的重要性认识不足,重生产,轻包装,给企业本身和消费者都造成了巨大的损失。据不完全统计,我国的商品因包装不善引起流通过程中的损失超过一百亿元,几乎等于全国包装工业的总产值。许多产品在装卸、运输、仓储过程中因为没有合理而科学的包装,平均损失率很高。例如,袋装水泥为4.5%,化肥为4%,平板玻璃为8%,瓶罐玻璃为10%,民用陶瓷为15%,鲜蛋为15%,鲜果为9%,等等。至于电视机、电冰箱、洗衣机、自行车、摩托车、计算机、以及各种贵重机电产品,由于包装不善而在运输过程中造成的损失,更是不胜枚数,经常导致索赔纠纷,有的还给用户造成严重经济损失。国家已制定出“谁的产品谁负责包装,谁造成的破损谁负责解决”的原则,实行“包装许可证”制度,使不符合标准的包装,不得进入流通领域。包装动力学将从力学概念上为解决上述问题奠定理论基础。

包装是人们为了在流通领域中保护产品,方便储运,促进销售,易于使用,按一定技术方法而采用的容器、材料及辅助物等的总体名称。产品经过包装所形成的总体,称作包装件。包装动力学是一门以包装件为研究对象的科学。

包装件通常由内装物、缓冲材料和外包装三部分组成。包装缓冲设计的目的,在于合理设计缓冲材料的形状和尺寸,正确选择外包装,使内装物在包装费用最低的前提下,仍不致在流通过程中受到使产品失去或降低使用价值的损伤。因此,包装动力学要研究包装内所装的产品在流通过程中,特别是在受到冲击和振动时,如何运动以及引起运动的原因;要研究引起包装件运动的外部环境条件;要研究产品在恶劣的流通条件下能够承受的最大强度极限;要研究作为减损主要手段的缓冲材料的性能;最后要研究由内装物、缓冲材料和外包装构成的振动系统,在外界冲击振动作用下的运动规律的理论 and 试验方法。可见,这门学科具有丰富的内容,正随着现代科学技术的进步而不断发展成更系统而完善的新兴学科。

第二节 包装动力学的发展

早在公元前三百多年,希腊杰出的哲学家、逻辑学家和科学家亚里士多德(Aristotle)曾在他的名著《物理学》中,试图寻找物理系统的运动和引起运动的力之间的关系,但是没有成功,没有能得出正确的结果。直到十七世纪,I. 牛顿(Newton, Sir Isaac)才在他的近代科学奠基性巨著《自然科学的数学原理》(1686年)一书中,正确地阐明了运动与力的关系,提出了著名的力学三大定律,适用于一切物体的运动,除非物体的运动速度接近光速。物体运动与力之间关系的研究,通常称为动力学。

尽管爱因斯坦(Einstein)在1916年发表的《广义相对论基础》一书中对牛顿定律进行了革命性的修正,对空间、时间和引力都赋予了完整的新概念,然而,牛顿定律仍然是一般动力学的理论基础,因为包装件各质点的运动速度离每秒30万公里的光速要低得多。由于牛顿定律是对单个质点说的,并且可以推广到质点系统和刚体系统,用物理的座标和力来描述运动,以矢量来表示这些量,所以这种方法常常称为矢量力学。它的主

要缺点在于它分别地考虑系统的各个部分，因而需要考虑由于各部分相互约束所引起的作用力。这些力的计算往往是十分繁琐的，而又用途不大。法国一意大利数学家拉格朗日（Lagrange）在1788年出版的经典著作《分析力学》中，对自牛顿以来百余年间力学的研究进行了透彻的总结。他把系统作为整体来考虑，而不是分成各个部分，因此就不需要计算各部分之间的相互作用力，采用功和动能这两个标量函数来阐明力学问题。分析力学有一个较为广阔的观点，它采用广义座标和广义力而不需要物理的座标和力，得到的数学表达式将与任何特殊的座标系无关。分析力学大大依赖于虚位移的概念，它导致了变分法的发展，所以分析力学也称为**变分法力学**。

1877年，英国伟大的经典物理学家瑞利（J.W.S.Rayleigh）出版了他的名著《声学原理》，书中讨论了弹性固体和气体的振动及共振问题，为解决工程实际中十分复杂的动力学问题开辟了一条新路。

动力学理论发展到本世纪中叶，由于高速数字计算机的发展，出现了以**有限元法**为代表的新概念和新方法。过去牛顿、拉格朗日和瑞利等古典理论难以解决的复杂结构系统动力学分析问题，如今可以十分方便地得到满意的解决。这个方法在50年代起源于航空工程中飞机结构分析矩阵方法^[1]，由克劳夫（Clough, R, W）在1960年发表的文章^[2]中首次引用“有限元法”这一名称。在随后的这20多年中，有限元法获得了广泛的推广和应用，并发展出**边界元法**等新的方法。

包装动力学作为动力学研究的一个独特的分支，是由美国贝尔电话实验室的明德林（R.D.Mindlin）在他的著名论文《缓冲包装动力学》中于1945年首先提出来的。在40年代的那个时期，还只会采用刨花、棉花、纸屑、锯末、矿渣棉等几种有限的缓冲材料；特别精密的贵重仪器，则采用弹簧悬挂包装。由于第二次世界大战正在全球进行，为了把军需物资，尤其是把各种电子设备运送到作战现场，已经采用尖端的模拟电子计算机来进行精确的分析，试图以此来代替多少年靠“试探法”或凭经验进行缓冲包装设计的传统作法。明德林正是针对这个要求而开展了比较系统的理论研究。这一研究成果的发表，为后来的包装动力学奠定了一个良好的基础。

明德林在这篇论文中指出，造成包装件在流通过程中产生机械损伤，原因不外是保护性缓冲不当，包装容器不够坚固，或者产品本身太脆弱。过去，为了减少包装件的机械破损，主要是靠做大量的跌落试验，从中确定出哪一种包装结构较合适。但是，对于精密贵重仪器，不允许做大量的跌落试验，只能做非破坏性跌落试验，通过其测量数据进行理论计算，以确定包装设计的合理性。为此，必须研究缓冲的存在使包装件受到振动冲击时可能出现多大的加速度，这一加速度随时间变化的曲线形状如何，以及包装件结构元件的强度、振动自然频率和阻尼等参数。他的研究力图从理论上来回答这些问题，为前面提到的理论计算提供依据。论文分四部分。第一部分讨论在缓冲呈非线性情况下如何估计包装件的最大加速度。第二部分主要是确定加速度-时间关系曲线的形状。第三部分讨论加速度对包装件强度的影响，并给出确定包装件强度是否满足要求的方法；这里没有研究强度确定本身，但强度测量的数据，基本上都在这部分内容中穿插列出。第四部分给出了不假定质量和弹性，为集中参数条件下关于分布质量与弹性参数影响的某些考虑。主要的讨论都是在把包装简化成二自由度动力学模型的基础上进行的。

当前广泛应用的表征缓冲材料特性的缓冲系数概念也是由明德林首先提出的。

在随后的二十多年里，各国学者在包装试验和包装标准的制定上做了大量的工作。早在1949年，英国的包装与同业贸易研究协会（PATRA, Packaging and Allied Trades Research Association）曾建立起第一个完整的包装试验站，进行了大量的研究，在试验方法和结果分析方面积累了许多经验。二十四年后，佩因（Paine）主编的《包装评价》^[5]一书对此进行了全面的总结。包装与同业贸易研究协会后来改名为纸与纸板、印刷和包装工业研究协会（PIRA, Paper and Board, Printing and Packaging Industries Research Association），与英国标准学会（BSI, British Standards Institution）和国际标准化组织（ISO, International Standardization Organization）一起，进一步发展了更为合理的包装试验规范。

1961年，缓冲包装设计被作为一个独立的专门章节，列入了美国的《冲击与振动手册》^[4]。在1964年和1978年美国国防部制定的《军事标准手册》^[6]中，也介绍了缓冲包装设计的内容，并在1968年出版的《缓冲设计的理论与实践》^[7]一书中，进行了全面系统的总结和归纳。

由于包装件结构十分复杂，缓冲材料的非线性特性十分突出，明德林建立的二自由度简化动力学模型，只能得到近似的计算结果。历来采用的跌落试验机，在对包装好的产品进行跌落试验时，很难保持冲击时的姿势和防止反弹，冲击加速度-时间曲线的形状难以控制，无法精确地推算出产品的强度。因此，无论是理论上，还是试验方法及设备，都要求有所突破。1968年，R.E. 牛顿教授发表了“脆值（Fragility）评价的理论与试验程序”^[8]一文，打开了冲击试验的大门，奠定了现代缓冲包装设计的基础。有关产品允许加速度的损伤边界的确定，为精确估计产品脆值并较合理地设计包装创造了条件。与此同时，美国兰斯蒙特（Lansmont）公司和MTS系统公司相继开发出适合确定产品损伤边界的冲击试验机。这种试验机具有可编程序器，能随意调节冲击加速度脉冲的形状和持续时间，易于准确调整、保持跌落的姿势和重心位置。

围绕脆值的评价和损伤边界曲线的理论与实验研究，一种目前世界上公认为比较合理缓冲包装设计五步法，由MTS系统公司和密执安州立大学包装学院在七十年代末期共同研制成功^[9,10]。缓冲包装设计的五个步骤是：

1) 确定环境

冲击：选择用户希望防护的最苛刻的跌落高度。

振动：确定有代表性的加速度-频率曲线。

2) 确定产品的脆值

冲击：确定产品的冲击损伤边界。

振动：确定产品的临界共振频率。

3) 选用适当的缓冲垫

选用的缓冲垫材质与结构形状和尺寸，对冲击与振动都可提供充分的防护作用，同时又是最经济的。

4) 设计与制造原型包装

5) 试验原型包装

冲击：采用“阶跃速度”（Step Velocity）试验方法。

振动：试验在临界共振频率时是否能充分防护。

上述方法提出后，迅速在美国和世界各地推广应用。经过近十年的发展，终于被美国国家标准学会（ANSI, American National Standards Institute）列入美国试验材料学会（ASTM, American Society for Testing and Materials）标准。后来，兰斯蒙公司经理布雷斯克（Bresk, Frank C.）又提出缓冲包装设计的六步法^[11]，并给出了与每一个步骤相关连的ASTM标准：

1) 定义运输环境：冲击和振动——ASTM D 4169。

2) 产品脆值估计：冲击——ASTM D 3332。

3) 产品重新设计：如果产品脆值太低，应重新改进设计产品，以提出其脆值。这一步是唯一区别于前述的五步法的一步，无ASTM标准可供应用。

4) 缓冲垫材料计算：冲击（板型材料）——ASTM D 1596；冲击（现场发泡材料）——ASTM D 4168；振动——尚无ASTM标准。

5) 设计包装系统：利用第1、2和4步骤的数据进行设计，无ASTM标准可供应用。

6) 试验包装系统原型：冲击——ASTM D 775, ASTM D 1083, ASTM D 4003, ASTM D 4169；振动——ASTM D 999, ASTM D 4169。

上述合乎逻辑地设计和试验缓冲包装的基本程序，不仅被美国工程界广泛应用，并列入美国《包装工程手册》^[12]，编入《包装动力学》教材^[13]。各国按照各自实际情况修订了相应的包装标准。日本在1987年3月起实施了新的标准包装物试验方法通则JIS Z 0200等。我国也制定了《运输包装件基本试验》等国家标准。

尽管上述缓冲包装设计的五步或六步法，比之明德林的40或50年代，有了很大的进步，能够比较精确地确定产品的脆值，并可参照缓冲系数计算出缓冲垫的承压面积与厚度，但是，这种方法还不能解决产品中易损部位的动态分析，难以探讨复杂形状缓冲垫的优化设计问题。采用有限元法等更精细的动力学分析方法，辅以模态分析与参数识别等新技术，使得精确分析产品任意部位的加速度响应和对缓冲垫的局部尺寸（而不是整个厚度）进行优化设计成为可能，从而可以进一步提高产品的强度和减少缓冲材料用量。近年来，在使包装动力学深入发展的这些方面，我们已有了新的突破^[14]。

第三节 包装动力学课程的内容和地位

包装动力学是一门研究包装件在流通过程中力学行为的科学。就其内容的性质而论，包装动力学所研究的问题又可归纳为两类：第一类问题是关于对已有包装件的动力学分析；第二类问题是关于包装设计，或称动力综合，包括结构选择、运动设计和动力设计。

这门课程是以高等数学、普通物理及工程力学等课程为基础的，它又为以后学习运输包装和有关包装专业课程打好理论基础，并能使学生在掌握新的科学技术成就，培养工程能力和实验能力等方面受到某些必要的、严格的基本技能训练。因此，包装动力学

是包装工程专业的一门很重要的技术基础课程，它在教学计划中不仅有承上启下的性质，而且在工程师的培养上还有其特殊的作用。

因为包装工程专业属于非机类专业，只学习工程力学，而不是学习理论力学和材料力学，有关动力学知识要求比理论力学还要高。所以，前面几章针对包装动力学要求，对理论力学的动力学部分内容和振动理论的内容进行了扩展，既有利于学生循序渐进地系统掌握动力学的主要内容，也便于其他工程技术人员进行自学。后面几章的内容则是在一般动力学知识基础上，将其有关原理应用于实际的包装缓冲系统的分析与设计，形成它自己的独特体系。因为缓冲材料不同于常见的机械结构材料，必须讨论这类材料的非线性弹性和蠕变等特殊性质。流通环境的研究，对于确定产品在流通中可能受到的损伤具有决定性意义，必须把几十年来积累的数据全面系统地介绍给读者。符合一般工程设计要求的单自由度和双自由度包装系统的动力分析，为包装设计提供了最基本的计算公式。包装试验方法是现代包装设计必不可少的重要环节，也是本课程的一个组成部分。

虽然本课程要讨论到缓冲包装问题，但只是从力学分析角度出发。以系统工程观点全面研究包装设计的任务，将由后续的运输包装、包装系统设计等专业课来解决。在这些专业课中讨论包装设计时，不仅要按照包装动力学的基本原理进行动力设计，还要考虑到社会、经济和技术等众多因素，进行优化设计，涉及流通过程中各个环节的所有问题。

根据大学本专科的教学大纲要求，本书对于包装动力学的最新进展，未展开讨论。因为这些进展还未形成规范性的设计程序，涉及的有限元法、模态分析和参数识别等内容，超出了本科教学要求，属于研究生课程的范畴。但是，只要掌握了本书的基本原理，最新发展的有关内容即可触类旁通。

第二章 包装力学与流变学基本概念

第一节 包装力学概念

一、力和加速度

牛顿定律指出：质点的加速度大小与它所受力的大小成正比，且方向一致。如图2-1所示。表达式为：

$$ma = F \quad (2-1)$$

若沿力矢 F 的方向取坐标轴 ox ，则力矢 F 和加速度矢 a 在 x 轴上的投影组成如下线性（标量）方程：

$$ma = F \quad (2-2)$$

在地面附近，物体的重量（重力）与质量有如下关系：

$$W = mg \quad (2-3)$$

其中 g 表示当地的重力加速度。

由（2-2）和（2-3）式可求得一个无量纲表达式：

$$\frac{F}{W} = \frac{ma}{mg} = \frac{a}{g} \quad (2-4)$$

工程上用 G 表示 $\frac{a}{g}$ ，称为 G 因子。它表征加速度为重力加速度的倍数。因而有公式：

$$F = GW \quad (2-5)$$

该式表征力是物体重量的 G 倍。这个力 F 应理解为使物体获得加速度 $a = Gg$ 的合外力。有时用 g 作为加速度的单位，用 W 作为力的单位，则 G 明确指出了所研究物体的加速度和合外力。即 G 不仅表征加速度为重力加速度的倍数，亦表征合外力为重力的倍数。所以， G 因子在包装力学研究和实用中是一个极重要的量，又是一种极简明的表达方法。

值得指出的是：包装力学中谈及加速度时往往用 G 值表示。物体产生的最大加速度用 G_m 表示。物品所允许的最大加速度（保证不破损的条件下）用 G_e 表示，且称 G_e 值为脆值或称为该物品的易损度。为保证物品不发生破损，显然要求满足条件：

$$G_m \leq G_e \quad (2-6)$$

关于重力加速度 g ，它随地而异，但为了研究的方便，国际上统一采用 $g = 9.80665 \text{ m/s}^2$ 或近似为 9.8 m/s^2 。英美仍使用英制： $g = 32.2 \text{ ft/s}^2 = 386.4 \text{ in/s}^2$ 。（ft 表呎，in 表吋，且 $1 \text{ ft} = 12 \text{ in}$ ， $1 \text{ in} = 2.53995 \text{ cm}$ ）

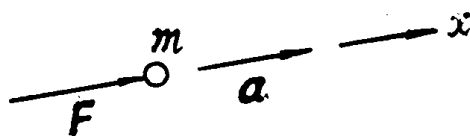


图2-1 力和加速度

当考虑物品称重时，切不可忽视各地重力加速度的差异。这对于贵重的、大宗货物的国际间贸易是十分重要的。

二、力的时间效应

力 F 在 t_1 到 t_2 的时间间隔内的累积效应称为力 F 在此时间间隔内的冲量，表为：

$$S = \int_{t_1}^{t_2} F dt \quad (2-7)$$

其中 Fdt 称为元冲量。

冲量 S 将引起物体动量的改变，关系式为：

$$\Delta(mv) = mv_2 - mv_1 = S \quad (2-8)$$

这只需将加速度表达式

$$a = \frac{dv}{dt} \quad (2-9)$$

代入 (2-1) 式，且视 m 为常量，则可得到更普遍的公式：

$$\frac{d(mv)}{dt} = F \quad (2-10)$$

又可改写成：

$$d(mv) = F dt \quad (2-11)$$

那么在 t_1 到 t_2 间隔内积分，便得到 (2-8) 式。

若 F 与 v_1 方向一致，则 (2-8) 式可写成数性方程：

$$mv_2 - mv_1 = \int_{t_1}^{t_2} F dt \quad (2-8)'$$

由 (2-9) 式，或由上式可得

$$\Delta v = v_2 - v_1 = \int_{t_1}^{t_2} a dt \quad (2-9)'$$

该式说明速度的改变量等于加速度曲线下在 t_1 到 t_2 间所包围的面积(如图2-2所示)。其大小与加速度曲线(形状、峰值)和时间间隔有关。显然这个面积的大小也表征了物体动量的改变量。可见力对物体的作用效果完全可以用加速度的时间曲线来表征，其效果取决于三个要素：时间间隔 ($\Delta t = t_2 - t_1$)，峰值 (a_m 或 G_m) 和波形。

当 Δt 和 a_m 一定时，由 (2-9)' 积分可得到不同波形时所围面积，即 Δv ：

矩形波 $\Delta v = a_m \Delta t$

半正弦波 $\Delta v = \frac{2}{\pi} a_m \Delta t$

正矢波和对称三角形波： $\Delta v = \frac{1}{2} a_m \Delta t$

上述四种常见加速度波形如图2-2所示。

刚体可视为一质点，在自由下落中仅受重力作用，该力为一常力(大小、方向都不变)，可取 y 坐标轴铅垂向下，原点取在释放位置，则由 (2-8) 式可得数性方程式：

$$\frac{W}{g} (v_2 - v_1) = W (t_2 - t_1)$$

化简得

$$\Delta v = g \Delta t$$

也可以由于自由落体运动加速度为常量 g ，利用 (2-9)' 式直接得到。

若 $t_1 = 0$ ， $v_1 = 0$ ，那么 $v_2 = gt_2$ ，可写成 $v = gt$ 。因 $v = \frac{dy}{dt}$ ，所以 $\Delta y =$

$$\frac{1}{2} gt^2, v^2 = 2g \Delta y$$

当然由 v 与 t 的线性关系，可知平均速度 $\bar{v} = \frac{g}{2} t$ ，同样可推得 $\Delta y = \bar{v} t =$

$$\frac{1}{2} gt^2。$$

对于变形体，当外力作用于作用点的瞬间，处于作用点的质点的运动状态的改变需要时间，因为其位置相对于邻近质点发生改变，分子间产生作用力才使邻近质点受力，再经历一时间过程才发生运动状态的改变。

可见变形体的受力运动改变有一个时间序列问题。这可举一个金属弹簧为例来理解它。当弹簧在空中自由降落时，因处于失重状态，各圈之间的距离均等。而当跌落于地面时，首先是最底圈受地面撞击力作用，由运动而静止；但由下向上的第二圈仍在运动中，随时间进行，二者间距在缩小，其速度也在减小；第三圈与第二圈之间随时间的进行，距离随之亦在减小，第三圈的速度亦随之减小；……。我们会清楚地看到：随时间的进行，弹簧各圈间距离由原来的均等变为下密上疏，最终全部密实。这时弹簧由于撞击而全部被压紧，这是需要一定长的时间的。由此也可以理解快速锤击金属时，尽管力很大，但因作用时间很短，往往只在其表面打出一个痕迹，而内部金属并未受到多大影响；如果是一个长期作用的力加在材料上，虽然力不甚大，作用点处无明显局部效应，但随时间延长会导致材料整体变形。包装材料多是弹塑性材料，更应十分注意力的时间效应。

三、力的位移效应

1. 功

力 $\mathbf{F}$ 在位移 $d\mathbf{r}$ 上的效应被定义为力 $\mathbf{F}$ 的元功：

$$\delta W = \mathbf{F} \cdot d\mathbf{r} \quad (2-12)$$

这里使用变分符号 δ ，是因为 $\mathbf{F} \cdot d\mathbf{r}$ 不一定是一全微分。

注意到 $d\mathbf{r} = \mathbf{v} dt$ ，则 (2-12) 变为

$$\begin{aligned} \delta W &= \mathbf{F} \cdot \mathbf{v} dt \\ &= F_{\tau} v dt \end{aligned} \quad (2-13)$$

其中 $F_{\tau} = F \cos(\mathbf{F}, \mathbf{v})$ ，可见仅沿速度方向的分力做功。当 $\mathbf{F}$ 与 $\mathbf{v}$ 垂直时，尽管作用时

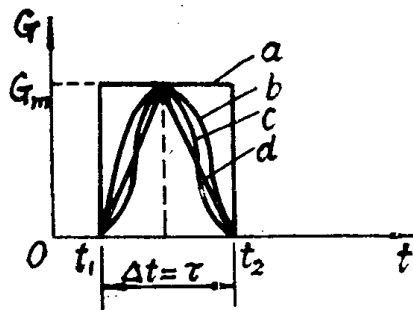


图2-2 加速度波形

a) 矩形波 $G = G_m$ b) 半正弦波 $G = G_m \sin \frac{\pi}{\tau} (t - t_1)$

c) 正矢波 $G = G_m \sin^2 [\frac{\pi}{\tau} (t - t_1)]$ d) 三角形波

$$G = \begin{cases} G_m \frac{t - t_1}{\tau/2} & (t_1 \leq t \leq \frac{t_1 + t_2}{2}) \\ G_m \frac{t_2 - t}{\tau/2} & (\frac{t_1 + t_2}{2} \leq t \leq t_2) \end{cases}$$

间极长, 该力也不会做功。

力的功将引起被作用质点动能的改变:

$$d\left(\frac{1}{2}mv^2\right) = \delta W \quad (2-14)$$

这可由 (2-1) 式改写成 $m \frac{dv}{dt} = F$

因 $d\mathbf{r} = \mathbf{v}dt$, 写出数性积:

$$m \frac{dv}{dt} \cdot \mathbf{v}dt = \mathbf{F} \cdot d\mathbf{r}$$

此即 (2-14) 式。其中 $\frac{1}{2}mv^2$ 为质点的动能。

若沿轨迹曲线 $\widehat{M_1M_2}$ 积分, 可得

$$\Delta T = W_{12} \quad (2-15)$$

其中动能增量 $\Delta T = T_2 - T_1$, 而 $T_1 = \frac{1}{2}mv_1^2$, $T_2 = \frac{1}{2}mv_2^2$; 力 $\mathbf{F}$ 由 M_1 至 M_2 点所作的功 $W_{12} = \int_{M_1}^{M_2} \mathbf{F} \cdot d\mathbf{r} = \int_{s_1}^{s_2} F \cos\theta ds$, 而 θ 为力 $\mathbf{F}$ 与轨迹切向矢量间的夹角, s 为沿轨迹曲线的自然坐标。

(2-15) 式又可写成:

$$\Delta v^2 = v_2^2 - v_1^2 = \frac{2W_{12}}{m} \quad (2-16)$$

它与下述三个公式形式相似, 都是十分有用的公式:

$$\Delta v = v_2 - v_1 = \frac{S}{m} \quad (2-17)$$

$$a = \frac{F}{m} \quad (2-18)$$

$$G = \frac{F}{W} \quad (2-19)$$

但须注意 (2-17)、(2-18) 的适用条件。

1) 重力的功: 当物体由高处落到低处时, 重力作正功, 其大小等于重量 W 与高度差 h 的乘积:

$$W_{12} = Wh \quad (2-20)$$

这说明重力的功仅取决于高度差, 与经过的路径无关。

对于自由落体运动, $v_1 = 0$, $W_{12} = Wh$, 由 (2-20) 式可得终速:

$$v = \sqrt{\frac{2W_{12}}{m}} = \sqrt{2gh} \quad (2-21)$$

这与前述 $v^2 = 2g\Delta y$ 相符。而由 $\Delta y = \frac{1}{2}gt^2$ 得下降时间:

$$t = \sqrt{\frac{2h}{g}} \quad (2-22)$$