

带式输送机

动力学及设计

李光布 编著

22

机械工业出版社

99368D

# 带式输送机动 力学及设计

李光布 编著



机械工业出版社

本书综合了国内外最新研究成果,系统地叙述了带式输送机各零部件及系统的特性、动力学现象及本质,对影响带式输送机的各种因素进行了定量的分析,尤其对输送机的纵向和横向振动作了重点讨论。本书不仅提供了大量实测和计算的图、表、公式和实例,而且还介绍了带式输送机动态设计方法的内容、作用、测试手段以及设计软件、实验项目等。

本书可供从事带式输送机设计、制造的科研院所和厂矿企业的工程技术人员使用,也可供大专院校的师生作教材使用。

### 图书在版编目(CIP)数据

带式输送机动力学及设计/李光布编著. —北京:机械工业出版社,1998.6

ISBN 7-111-06370-8

I. 带… II. 李… III. ①带式输送机-机械学:动力学 ②带式输送机-机械设计 IV. TH238.02

中国版本图书馆CIP数据核字(98)第09953号

出版人:马九荣(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)  
责任编辑:何月秋 版式设计:冉晓华 责任校对:李汝庚  
封面设计:创先河 责任印制:路琳

中国建筑工业出版社密云印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

1998年7月第1版第1次印刷

850mm×1168mm<sup>1</sup>/<sub>32</sub>·6印张·156千字

0 001—1000册

定价:12.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

# 前 言

随着带式输送机在国民经济各部门中日益广泛的应用，其越来越朝着大型化、复杂化、自动化方向发展，广大工程技术人员和高校师生迫切需要较系统和全面地了解 and 掌握带式输送机的动力学现象、本质和规律；希望有一种有效的方法来帮助他们解决工程设计和应用中出现的动态问题——选择最佳设计方案和参数、预测系统特性及提供有用的资料等；他们也希望有一种动态仿真技术——只需在计算机上就可测试带式输送机的性能和参数，帮助他们解决实验、设计等问题。作者编写此书试图让工程技术人员掌握一门新的设计方法和为大学改革教学内容做些开拓性工作。

本书在注重理论性和系统性的同时，也比较注重实用性和可查性。全书编排不是按通常的动力学体系，而是按带式输送机零部件和系统动力学现象的顺序进行编排。书中收录有大量的图、表和实例。全书共分两大部分：第一部分为动力学原理，包括第一至第四章；第二部分为动态设计，包括第五至第七章。第一、二、三章在简单讨论了胶带、托辊、驱动装置、制动装置及拉紧装置等技术性能、规格的基础上，着重分析其动力学特性，建立了相应的动力模型和方程，以及特定条件下的动力响应，并从动力学角度分析了有关装置、部件的故障原因及解决办法。第四章着重讨论了带式输送机纵向振动、横向振动及胶带跑偏的机理，建立了数学方程式和数学模型，并以实例加以详细的分析，得到了许多有用的结论。第五章分析了带式输送机动态设计内容、过程和具体方法，并列举了几个实例说明动态设计方法的全过程和作用。另外还讨论了投资费用问题、安全系数问题等。第六章介绍了带式输送机从胶带测试到系统参数测试的方法和装置。第七章给出

了带式输送机动态模拟软件的内容及使用方法、实验项目等。书中许多内容已在教学和工程实践中使用过。为配合本书的学习和工程设计，编者可提供带式输送机动态模拟软件。本书可供从事带式输送机设计、制造和使用的科技人员使用，也可供高校相关专业学生作为教材使用。

蔡学熙同志审阅了全书，并提出了许多宝贵意见。高勇同志为本书调试了有关计算机程序。本书的编写还得到了杨罗泗、石延平等同志的支持和帮助，在此一并表示感谢。由于作者水平和经验所限，书中难免有不少缺点和错误，恳请广大读者批评指正。

编者

# 目 录

前 言	
绪 论	1
<b>第一章 胶带与托辊的力学特性</b>	<b>5</b>
第一节 胶带、托辊的类型和技术规格	5
第二节 胶带的静、动特性	7
第三节 胶带的动力模型	12
第四节 胶带动特性的分析法	19
第五节 悬垂状态下胶带的力学特性	23
第六节 胶带覆盖层的力学特性	27
第七节 胶带运行的阻力特性	29
第八节 受料处胶带的动力特性	33
第九节 胶带运行的冲击特性	36
第十节 托辊的动载荷系数	39
<b>第二章 驱动装置和制动装置特性</b>	<b>43</b>
第一节 对驱动装置和制动装置的要求	43
第二节 驱动装置和制动装置的类型及特性	47
第三节 传动机构动力学	55
第四节 起、制动时系统的动态响应	58
第五节 驱动装置和制动装置的比较	61
<b>第三章 拉紧装置及其特性</b>	<b>68</b>
第一节 拉紧装置的类型及其力学特点	68
第二节 拉紧装置的动态特性	72
第三节 拉紧装置的振动特性	79
第四节 拉紧装置在使用中出现的问题	82

<b>第四章 带式输送机动特性的研究</b> .....	86
第一节 带式输送机纵向动特性的牛顿分析法 .....	86
第二节 带式输送机纵向动特性的有限元分析法 .....	87
第三节 带式输送机纵向动特性的波动分析法 .....	94
第四节 纵向动特性的计算机分析 .....	106
第五节 带式输送机横向振动分析 .....	113
第六节 带式输送机胶带跑偏特性简介 .....	124
<b>第五章 带式输送机的动态设计</b> .....	128
第一节 带式输送机的常规设计 .....	128
第二节 带式输送机纵向动张力的设计 .....	139
第三节 带式输送机横向稳定性的设计 .....	142
第四节 带式输送机动态设计应用实例 .....	145
第五节 带式输送机选型设计中几个主要问题的讨论 .....	152
<b>第六章 带式输送机测试技术</b> .....	156
第一节 概述 .....	156
第二节 胶带特征参数的测试 .....	157
第三节 运动学参数的测试 .....	161
第四节 力学参数的测试 .....	163
第五节 振动参数的测试 .....	167
<b>第七章 带式输送机的动态模拟实验</b> .....	170
第一节 用户说明 .....	170
第二节 常用实验项目 .....	173
附录 带式输送机动态设计软件程序 .....	180
参考文献 .....	184

## 结 论

随着现代化工业的不断发展，带式输送机已经成为国民经济各部门生产过程中重要的组成部分。由于其应用范围的扩大和对其需求量的增加，带式输送机本身也有了很大的发展。长距离、大运量、高速度正成为其发展方向。目前，世界上单机运距最长已达 30.4km，且已用在澳大利亚的铝钒土矿上。由 17 条带式输送机串联组成的运输系统已在荷兰鹿特丹矿山使用，运距为 200.6km。目前世界上运输量最大的一条带式输送机已在德国露天煤矿使用，其运输量为 37500t/h，带速为 7.4m/s。目前最高带速已达 9m/s。

为使带式输送机安全可靠地运行，其结构系统必须具有良好的静、动特性。传统的设计比较注重静特性计算，而对动特性考虑的比较少。带式输送机的动特性或动力学现象主要反映在如下几方面：

1) 纵向振动：这是一种沿胶带纵向产生的振动现象，是由于胶带为粘弹性体，在外界扰动力(驱动力、制动力、阻力等)作用下产生的一种振动，这是带式输送机动力学现象的最主要部分之一，对输送机的技术经济指标影响也最大。它通常产生于运行的过渡过程中，如起动、制动等。

2) 横向振动：这种振动现象是由于胶带平放在托辊上时，产生了一定的悬垂度而构成的薄板振动体系，振动方向为铅垂面内。当系统设计不当时会产生共振或振幅较大的振动，对设备危害极大。

3) 胶带跑偏：这是一种在胶带平面内，即胶带与托辊的线接触方向上，由一定的干扰力影响而产生的振动，这种振动可能会引起胶带的跑偏、撒料等现象。



4) 受料冲击: 在给胶带装料的过程中, 物料要以一定的动能或势能形式冲击胶带, 这种现象即受料冲击。

5) 运行冲击: 胶带和物料在运行过程中, 在铅垂面内和水平面内会产生变形, 当经过托辊时, 必然以一定的冲击影响托辊和胶带。

在带式输送机设计、选型和使用中, 只考虑其静特性是不够的, 在许多情况下, 动特性分析往往是决定带式输送机是否技术合理、安全可靠、经济可行的关键。下列现象往往是因未考虑动特性分析而造成的。

1) 带式输送机起动过猛, 引起胶带张力急剧升高, 拉紧装置工作不稳定, 使胶带安全系数大大降低。

2) 带式输送机起动不起来。

3) 胶带在驱动滚筒上打滑或打颤。

4) 胶带在托辊上运行不稳定, 引起物料撒落、胶带跑偏、托辊使用寿命降低。

5) 胶带被物料砸破, 引起胶带保护层受损, 带芯破坏。

6) 系统设计不合理、系统安全系数过高, 致使设备庞大, 成本过高, 经济指标不合理。

带式输送机动力学及设计的任务就是了解带式输送机的动力学现象和机理, 掌握动力学的基本规律, 根据设计要求, 能进行系统的静、动特性分析, 实现在设计阶段预测和优化输送机的动态特性, 进而实现对起、制动等过程的控制和优化。

采用动力学分析, 可解决带式输送机的如下问题:

1) 动态力的幅值及冲击波效应;

2) 拉紧装置的弹性伸长;

3) 起、制动时物料在倾斜布置输送机上的稳定性;

4) 起、制动规程或程序, 使其速度曲线可调(减少不必要的力扰乱, 以及由此而产生的负反馈);

5) 输送机纵向几何布置所决定的质量惯性瞬态特性;

6) 多电动机驱动的负荷分配问题;

- 7) 带拉紧调节系统的起、制动控制;
- 8) 合理的胶带强度安全系数;
- 9) 驱动装置、制动装置、拉紧装置的最佳安装位置;
- 10) 如何避免出现纵向自然频率响应。

带式输送机可以认为是由许多零部件组成的机电系统, 要达到全面地分析动力学的目的, 必须要考虑如下部件之间的数学模型: 电磁场与电动机转子; 联轴器; 制动器固定件与旋转件; 驱动滚筒与胶带; 胶带本身; 胶带与拉紧装置; 胶带与托辊; 胶带与物料。

目前, 描述它们的数学模型可以是公式也可以是曲线。这些模型的建立为在设计期间对所设计的带式输送机进行全面分析创造了条件。

近二三十年来, 带式输送机动力学及动态设计得到了迅速的发展。一方面, 带式输送机日益向高效率、高速度、高精度、高承载能力及高度自动化方向发展, 使得动力学问题更加突出; 另一方面, 电子计算机与现代测试、分析设备的发展与完善, 又为带式输送机动力学的发展提供了良好的条件。

在国外, 一条大型带式输送机的完整设计一般都要在有关的动态分析软件上进行分析、计算, 并以此作为修改参数、调整零部件及优化系统的依据。根据动态模拟软件可以对整个带式输送机的动态特性进行实时、逐点的计算和显示。

在国内, 对带式输送机动力学的研究, 虽然起步较晚, 研究的系统性不够, 整体水平不很高, 设计的应用还很少等等, 但学术界和工程界人士正奋起直追, 紧跟国际最新研究动态, 在某些研究领域或方面, 已取得了十分喜人的成果, 缩短了与国外的差距。

带式输送机动力学是机械学的重要分支, 是对动力学的继承和发展; 带式输送机动态设计是现代设计方法的重要方面, 是对传统设计方法的延伸和丰富。可以说, 带式输送机动力学及设计已越来越受到各界人士的重视, 应用日益广泛, 是一个很有发展

前途的领域。

同时，带式输送机动力学及设计是发展中的一项新技术，涉及现代动态分析、计算机技术、测试分析技术、设计方法学等众多学科，还没有形成完整的动态设计理论、方法和体系，许多问题尚需进行深入广泛地研究。当前，为了提高我国带式输送机在国际市场的竞争能力，如何保证设备的高质量、高性能和低成本，是摆在科技人员面前的一个新问题。

# 第一章 胶带与托辊的力学特性

带式输送机是由许多零部件、装置组成的。胶带、托辊、机架等是沿输送机全长布置的，其特性对带式输送机的整体特性影响很大。本章在简单介绍这些零部件类型、规格的基础上，将重点讨论一下其动力学特性，包括动力学模型、动特性参数、动力学方程以及动载荷计算等。

## 第一节 胶带、托辊的类型和技术规格

### 一、胶带

胶带是带式输送机重要的部件之一，它既是承载件，又是传力件。在带式输送机运转过程中，胶带受各种大小和性质不同的载荷作用，处在极其复杂的应力状态下。同时，它的费用约占整个带式输送机费用的一半，在经济上起着举足轻重的作用。

胶带按结构可分为织物芯胶带和钢丝绳芯胶带。织物芯胶带包括普通帆布芯、维尼纶芯及尼龙芯胶带等类型，它由带芯和上下覆盖层组成。带芯由用经线和纬线编织的布层做成，其作用是承受载荷、传递牵引力以及装卸点物料对胶带的冲击力。从结构上讲，它是复合型材料；从力学上讲，胶带的经向和纬向强度是不同的。在分析胶带纵向动力特性时，可以不考虑它的各向异性，但在分析其横向动力特性时就应该考虑到它的各向异性特点。上下覆盖层可用天然橡胶或人造橡胶做成，起保护带芯、承受磨损和冲击作用。

钢丝绳芯胶带的带芯是由一系列平形布置的，与芯胶粘结在一起的钢丝绳组成的，它是典型的正交各向异性材料，纵向受力由钢丝绳承受。其特点是强度高、纵向弹性模量大、抗冲击性能好。相比之下，它的粘滞特性要比织物芯胶带弱，也就是说，织

物芯胶带的粘滞特性要比钢丝绳芯的明显。表 1-1 是钢丝绳芯胶带的技术规格，其中 ST 是日本阪东公司标准系列，GX 是国产系列。

表 1-1 钢丝绳芯胶带的技术规格

型 号	钢丝绳 直径 /mm	钢丝绳 中心距 /mm	胶 带				单位宽度 抗拉强度 /kN · cm <sup>-1</sup>	单位宽度 最大允许 张力 /N · cm <sup>-1</sup>	单位宽度 弹性模量 /kN · cm <sup>-1</sup>
			覆盖胶		胶带 总厚度 /mm	胶带面 质 量 /kg · m <sup>-2</sup>			
			上胶 厚度 /mm	下胶 厚度 /mm					
ST-500	2.5	12.0	5	5	12.5	16.1	5	715	299
ST-600	2.5	10.0	5	5	12.5	16.5	6	855	358.8
ST-700	3.0	11.5	5	5	13.0	17.5	7	1 000	438.3
ST-800	3.0	10.0	5	5	13.0	17.9	8	1 140	504
ST-900	3.3	10.5	5	5	13.3	18.6	9	1 280	573.37
ST-1000	4.1	14.5	5	5	14.1	20.0	10	1 430	641.4
ST-1250	4.6	14.5	5	5	14.6	21.6	12.5	1 790	827.6
ST-1600	4.6	11.5	5	5	14.6	22.9	16	2 290	1043.5
ST-2000	5.2	13.0	6	6	17.2	26.9	20	2 850	1000
ST-2500	6.0	13.5	6	6	18.0	30.0	25	3 570	1311.1
ST-3150	7.0	14.0	6	6	19.0	34.0	31.5	4 500	1714.3
ST-4000	8.0	14.0	6	6	20.0	38.8	40	5 710	2228.6
ST-5000	10.0	17.5	7	7	24.0	47.0	50	7 140	2817.1
GX-650	4.5	20	6	6	19.0	23.9	6.5	—	—
GX-800	4.5	17	6	6	19.0	24.3	8	—	—
GX-1000	4.5	13.5	6	6	19.0	25.0	10	—	—
GX-1250	4.5	11	6	6	19.0	25.7	12.5	—	—
GX-1600	6.75	20	7	7	23.0	32.2	16	—	—
GX-2000	6.75	16	7	7	23.0	33.7	20	—	—
GX-2500	8.1	17	8	8	27.0	40.2	25	—	—
GX-3000	9.18	18	8	8	28.0	41.9	30	—	—
GX-3500	9.99	18	8	8	28.0	43.6	35	—	—
GX-4000	10.3	17	8	8	29.0	46.6	40	—	—

## 二、托辊

托辊的作用是支承胶带，减少胶带运行阻力，并使胶带的悬垂度不超过一定限度，以保证胶带平稳地运行。

托辊按结构可分为槽形托辊、平形托辊、调心托辊和缓冲托辊。

槽形托辊由三个短托辊组合而成，槽角为 $30^{\circ}\sim 45^{\circ}$ 。槽形托辊组固定在机架上，并每隔一定距离(1~1.5m)安装一组。

平形托辊安装在空载分支上，由一个托辊组成，每隔2.5~3m安装一组。对于大型带式输送机，托辊间距可达7~8m。

调心托辊是纠正胶带跑偏的一种特殊托辊。

缓冲托辊主要是为了缓冲胶带及托辊在受料处所受冲击力的一种特殊托辊。缓冲托辊一般有三种形式：一种是直接在托辊外表面上安装橡胶圈；一种是三节托辊之间用弹簧连接；还有一种是托辊组安装在弹性体上，如钢丝绳机架或弹簧底座。

托辊本身由管体、轴承及其支座、心轴、密封及挡圈组成。表1-2是国产系列托辊的技术规格。

表 1-2 国产系列托辊的技术规格

胶带宽度/mm	800	1000	1200
托辊允许载荷/kN	2.7	4.3	4.8
托辊轴直径/mm	20	25	25
托辊直径/mm	89	108	108
轴承型号	204	305	305
轴承使用寿命/kh	16	21	16

### 三、机架

机架的结构形式可分为落地式和绳架吊挂式两种。落地式机架又有固定式和可拆移式两种。钢绳机架由两根纵向平行布置的钢绳组成。

## 第二节 胶带的静、动特性

### 一、胶带的静特性

胶带的静特性是指胶带在无限缓慢的外力作用下，经无限长时间后所表现出的静应力 $\sigma_s$ 与静应变 $\epsilon_s$ 之间的关系，由力学特性可知

$$E_s = \frac{\sigma_s}{\epsilon_s}$$

$$F = \sigma_s A$$

式中  $E_s$ ——胶带静弹性模量；

$\sigma_s$ ——静应力；

$\epsilon_s$ ——静应变；

$F$ ——外作用力；

$A$ ——胶带有效横截面积。

在带式输送机计算中，覆盖胶的弹性模量是单位面积上的受力值，如  $N/cm^2$ ；而带芯及胶带整体的弹性模量常用单位宽度上的受力值，如  $N/cm$  或  $N/(层 \cdot cm)$ ，这时，作用力  $F$  为

$$F = \sigma_s B \text{ 或 } F = \sigma_s B z$$

式中  $B$ ——胶带有效宽度；

$z$ ——胶带层数。

各种胶带允许的应变值 $[\epsilon]$ 为

$$[\epsilon] = \begin{cases} 2\% & \text{棉帆布芯} \\ 1\% \sim 1.5\% & \text{维尼纶、尼龙} \\ 0.2\% & \text{钢丝绳芯} \end{cases}$$

各种胶带单位宽度每层允许的最大拉断力 $[F]$ 为

$$[F] = \begin{cases} 630N/(层 \cdot cm) & \text{棉帆布芯} \\ 6000N/(层 \cdot cm) & \text{尼龙芯} \\ 80000N/cm & \text{钢丝绳芯} \end{cases}$$

表 1-3 还给出了各种胶带的伸长特性。

表 1-3 各种胶带的伸长特性

胶 带 种 类	弹性伸长率/%	永久伸长率/%
棉 帆 布 芯	0.3~0.5	0.8~1.0
尼 龙 芯	0.3~0.6	1.3~1.8
钢 丝 绳 芯	0.03~0.06	0.08~0.13

织物芯胶带由于有较明显的粘弹性特性，故它的静弹性模量常以平均值来表示，即

$$E_s = \begin{cases} \approx 4.7 & \text{kN}/(\text{层} \cdot \text{cm}) & \text{帆布芯} \\ \approx 24 & \text{kN}/(\text{层} \cdot \text{cm}) & \text{维尼纶芯} \\ \approx 60 & \text{kN}/(\text{层} \cdot \text{cm}) & \text{尼龙芯} \\ 325 \sim 3250 & \text{kN}/\text{cm} & \text{钢丝绳芯} \end{cases}$$

值得一提的是，最近用开夫勒新型材料做成的尼龙芯胶带，在质量相同的情况下，其抗拉强度比钢丝绳高 5 倍以上，弹性模量是钢丝的近 3 倍，是聚脂的 5 倍和尼龙的 12 倍。

## 二、胶带的动特性

胶带是由橡胶(覆盖层)与织物芯或钢丝绳芯组成的，它在受到外力作用时，所表现出的力学特性不仅仅是上节所分析的那一种特殊的力学特性，而且具有很复杂的动力特性，即应变不但与应力大小及加载历史有关，还与时间、频率、温度及材料特性有关，具体表现在：

### 1. 应力-应变的非线性关系

由图 1-1 可见，胶带即使在承受缓慢的拉力作用时，拉力和变形也不完全服从虎克定律，而是呈现出明显的非线性特性，其动弹性模量也不是一个固定值，而是应力  $\sigma$  的函数，即  $E_d = f(\sigma)$ 。

### 2. 滞后特性

由图 1-1 可见，给胶带施加作用力和减少作用力的静力曲线是不一致的，即所谓的滞后特性。这两种状态下胶带的力学特性不相同，有时相差竟达 1 倍以上。

需要说明的是新胶带滞后特性比旧胶带要严重，而且还不够稳定。不过经反复施加载荷和卸去载荷后，这种滞后现象就会稳定下来，并出现  $\sigma=0, \epsilon \neq 0$  现象，见图 1-1 中的虚线。

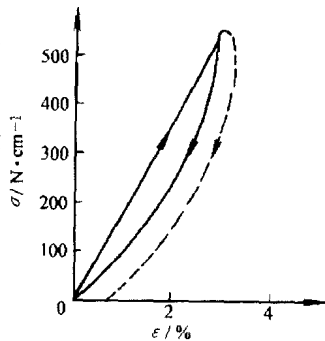


图 1-1 加载和卸载时某帆布芯胶带的应力、应变曲线<sup>[1]</sup>



关于托辊和胶带之间的滞后特性将在第二章中详细介绍。

### 3. 蠕变特性

所谓蠕变特性，就是指胶带在所受作用力大小不变时，其伸长与时间有关的特性，如图 1-2 所示，图中数据是在 NN-300 三层尼龙胶带上测得的，试件长 40mm，宽 40mm，加载力 545N，当加载时间为 5h 时，应变值达稳定值，为 0.0177。

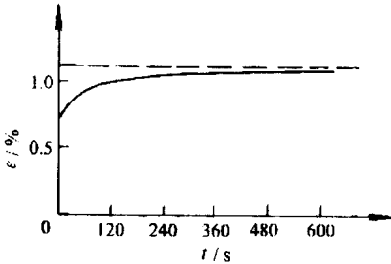


图 1-2 胶带的蠕变特性

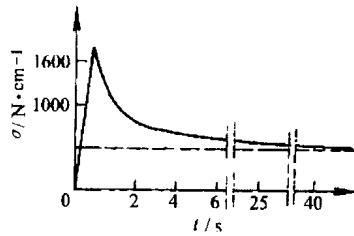


图 1-3 胶带的松弛特性

### 4. 松弛特性

松弛特性指胶带拉伸到一定长度后，将其两端固定，胶带应力随时间变化的关系，如图 1-3 所示。从图中不难看出，应力是按照指数规律衰减的，并且在一定时间后稳定下来。

### 5. 动特性

胶带在拉力作用下的变形与拉力的变化速度有关，这种特性称之为动特性。图 1-4 是帆布胶带(5层芯,80mm宽)在静载和不同频率下单位宽度弹性模量的实测曲线。

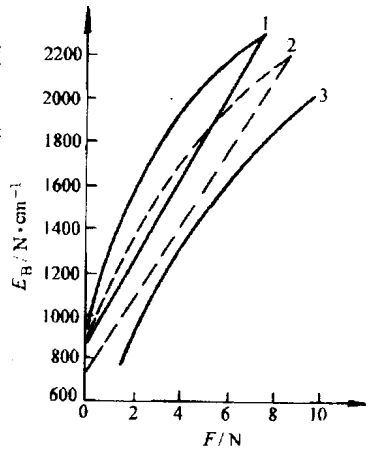


图 1-4 胶带单位宽度的弹性模量<sup>[1]</sup>

1—1.74Hz 2—0.07Hz 3—0Hz

表 1-4 是不同类型胶带动特性测试的结果<sup>[1]</sup>，可见胶带参数与振动频率的关系十分密切。