

冲击加速度测量

〔苏〕 B.C. 别里涅茨 著

董显铨 李文龙 王贵中 译
傅烈堂 校

新 时 代 出 版 社

内 容 简 介

本书比较全面地讲述冲击加速度参数测量的理论、实验及计算等方面的问题。对各种信号、系统模型、测量仪器、冲击加速度参数及误差等都给出了相应的解析式、经验公式以及图表。各章中都有一些计算实例与测量结果。

本书适用于从事冲击加速度测量、动力学参数测量、有关仪器设计的工程技术人员，以及计量工作者；也是有关专业大学生的一本有益的参考书。

ИЗМЕРЕНИЕ

УДАРНЫХ

УСКОРЕНИЙ

В. С. Пеллинец

Издательство стандартов

МОСКВА—1975

*

冲击加速度测量

〔苏〕 В. С. 别里涅茨 著

董显铨 李文龙 王贵中 译

傅烈堂 校

新时代出版社出版 新华书店北京发行所发行

国防工业出版社印刷厂印刷

850×1168毫米 32开本 9.3125印张 234千字

1982年5月第1版 1982年5月北京第1次印刷

印数：0,001—3,600册

统一书号：15241·2

定价：1.75元

作者的话●

冲击运动参数的研究是测量技术中最复杂的分支之一，对它的研究比较少。造成这一状况的原因是冲击测量实验需要记忆信息、处理所取的信息有其特殊之处，特别是利用频率域分析的可能性有限以及其他若干特征。在技术文献中尚无关于这一研究课题的综述性文献。

作者在拟定编写计划时，力求使选材适用的读者面广一些，同时也使专业很窄的专家有兴趣阅读它。于是写了第二章，主要供从事于测量仪器元件计算和对测量结果需做详尽分析的读者阅读。

《冲击加速度参数测量的实验技术》一章及《冲击加速度参数的测量误差》包含有对于安排冲击运动参数测量及估计相应的误差所必需的一些实用知识；《冲击加速度参数测量仪的校准原则》对计量工作者特别重要。

书中汇集了一些计量机构在冲击加速度参数精确测量方面的经验。

序 言

在现代技术及工业中，广泛地存在着不同特征的冲击过程，在某些工艺中有益地利用冲击过程——如模压、冲击弯曲、冲挤^[87]、挤压和冲孔、锻造、钻探^[208]、储油池的开挖以及许多其他工艺过程。但在某些情况下，冲击却是一种有害的作用，例如飞行器的着陆、产品的运输、物体的偶然跌落等等。

将产品及其零件置于专用的冲击实验装置上，使其承受机械冲击的作用，这对于保证产品的可靠性具有很大意义。这类冲击实验装置有机械式的^[24, 83, 226, 228, 282]、电动的^[90, 108]、液压式的^[246, 248]、利用高温技术的^[178, 272]、气动式的^[192]以及气炮^[260]。在许多物理实验过程中也会出现冲击过程，特别是在强磁场产生的时候^[184]。

在以上所列举的各种场合下，都有提高工艺过程效率、保证产品（最小的质量和尺寸）在实际使用条件下满足所要求的可靠性以及使实验规律更精确化的问题，这都关系到必须测量与监视冲击运动某些既定参数；况且，对冲击测量准确性的要求在日益增长。

冲击运动参数测量技术基本上与固体相互冲击作用的计算方法并行发展。因而，在将物体相互冲击作用视为瞬态现象研究之前，研究的成果是很有限的〔Леонардо Да Винчи, Галилей, Гюйгенс, Лейбниц〕，那时的实验基本上只是测量物体碰撞前与碰撞后的运动参数，这也就是牛顿求速度恢复（回弹）系数所用过的方法。

首先应该测量的是接触时间宽度等量值，它表征着物体对冲击响应的初始阶段（Риппергер, Гамбургер, Динник）^[66]，

Hopkinson 曾提出过一种在均匀杆中能确定冲击脉宽及最大应力的方法^[242]。

对于测量冲击的最大应力及压力, 广泛应用的是塑性及弹性测力仪器, 后来出现了丝式应变仪, 它普遍用于测量杆应变。压电式仪器的应用对冲击参数的测量技术来说是一重大进展^[86, 110, 239]。А. Н. Крылов 院士在其著名的论文^[108]中奠定了计算系统对冲击作用响应的理论基础, 当然也包括初期的测量传感器其力学系统响应的计算。Ю. И. Иориш 的巨著^[86]、М. И. Субботин 和 Н. П. Раевский 的著作^[189]、Г. С. Батуев 的著作^[14]、В. С. Пеллинец 的著作^[146, 147]和其他著作以及外国的技术文献^[102, 248, 261]研究了冲击参数测量技术的普遍问题。有相当多的文章和报告讨论冲击参数测量技术的一些专门问题——估计和分析测量结果。

从冲击运动参数测量技术的发展前景来说, 准确度的提高和测量范围的扩展有赖于计算技术的广泛应用以及新的物理现象在这一领域的应用, 如光量子发生器辐射频率的改进及高精度冲击参数测量系统的研制。

目 录

第一章 冲击加速度参数测量技术的一般原理	1
1.1 基本概念	1
1.1.1 冲击运动过程的定义和分类	1
1.1.2 动态测量的特点	3
1.2 表征冲击运动的关系式	5
1.2.1 冲击作用的解析近似表达式	5
1.2.2 表征冲击运动的各物理量间的原始关系式	23
1.2.3 各物理量间关系的变换	27
1.2.4 各物理量间的关系参数	33
1.2.5 运动学参数间的相互关系	42
1.3 最简单的力学系统	55
1.3.1 力学系统的线性模型	55
1.3.2 非线性模型	59
1.3.3 系统的特性	60
1.4 在冲击激励下的系统实验状态	66
1.5 测量实验的准备与实施程序	71
1.6 测量任务的确定	72
1.6.1 所求物理量及其参数的确定	72
1.6.2 补充条件的确定	75
1.7 原有资料的分析	77
1.7.1 二物体通过弹性元件的碰撞	77
1.7.2 二物体通过无滞后型非线性弹性元件的碰撞	79
1.7.3 二物体通过工作于塑性变形区的弹性元件的碰撞	81
1.7.4 球体与圆柱杆的碰撞	81
1.8 对测量结果的要求	82
1.8.1 被测体的模型选择	82

VIII

1.8.2 所研究物理量的选择	84
1.8.3 所测物理量的参数之选择	85
第二章 冲击加速度参数测量技术的理论问题	88
2.1 冲击谱	88
2.1.1 力学系统特性的确定	93
2.1.2 系统微分方程系数的确定	93
2.1.3 系统的频率特性的确定	114
2.1.4 系统的过渡函数及脉冲过渡函数的确定	119
2.1.5 线性系统特性的相互联系	121
2.2 借助于微分方程分析时间域里的冲击过程	128
2.2.1 一般原理	128
2.2.2 输出信号函数关系的确定	128
2.2.3 输出信号单一参数的确定	143
2.2.4 按输出信号的函数关系确定输入作用	151
2.2.5 解运动方程的仪器法	152
2.3 在时间域按过渡特性和脉冲过渡特性来分析冲击过程	154
2.3.1 在分析冲击过程中杜阿美积分计算的特点	154
2.3.2 按输出信号的函数关系确定输入作用	155
2.3.3 电子计算机的使用问题	158
2.4 在频率域分析冲击过程	159
2.4.1 一般原理	159
2.4.2 频率域分析的仪器法和数值算法	160
2.5 用列表数据和经验公式分析冲击过程	161
2.5.1 无衰减二类系统的峰值误差	162
2.5.2 微分放大器的峰值误差	163
2.5.3 积分放大器的峰值误差	164
2.5.4 二类系统前沿宽度的误差	164
2.5.5 微分放大器的前沿宽度的误差	165
2.5.6 积分放大器的前沿宽度的误差	165
2.6 干扰影响的计算和测量的动态修正	166
2.6.1 干扰影响的计算	166

2.6.2 测量的动态修正问题	176
2.7 测量结果的处理问题	179
2.7.1 函数关系式的平滑	179
2.7.2 平滑的数学法	180
2.7.3 用仪器平滑的方法	182
第三章 冲击加速度参数测量的实验技术	183
3.1 冲击加速度部分参数值的综合测量	183
3.1.1 测量传感器	183
3.1.2 适配放大器	192
3.1.3 记录仪器	205
3.2 冲击加速度的峰值测量	210
3.2.1 记录信号峰值的模拟式仪器的使用	211
3.2.2 峰值加速度计	211
3.3 上升到既定加速度值的时间测量	213
3.4 冲击谱分量的测量	216
3.5 其余冲击参数的测量	216
3.6 辅助仪器	217
3.6.1 测量传感器的电模拟器	217
3.6.2 扫描触发器	218
第四章 冲击加速度参数测量技术的计量问题	221
4.1 冲击加速度参数测量仪的校准原则	221
4.1.1 一般的考虑	221
4.1.2 测量器具的校准	222
4.1.3 冲击加速度检定系统的设计	227
4.1.4 高加速度检定装置	229
4.1.5 中加速度检定装置	233
4.1.6 低加速度检定装置	234

X

4.1.7 检定系统发展的远景	237
4.2 冲击加速度参数的测量误差	238
4.2.1 参数测量误差的估计原则	238
4.2.2 冲击加速度峰值测量误差的近似估计方法	241
4.2.3 测量结果的分项误差	243
4.2.4 分项误差的合成	262
附录一	264
附录二	268
附录三	270
参考文献	276

第一章 冲击加速度

参数测量技术的一般原理

1.1 基本概念

1.1.1 冲击运动过程的定义和分类

冲击运动的概念通常与物体(介质)同被研究对象的单次相互作用并伴随着在很小的空间内释放出相当大的能量相联系着的。同时还假定,被研究对象的最短固有振动周期或时间常数与冲击作用的宽度或是可比拟的,或是前者大于后者。这种观点在一定程度上限制了对测量系统做普遍分析的可能性,并且在做这种分析时有碍于利用统一的关系式,正因如此,短暂性的概念是相对的,因而,如果不另加预先说明。本书中所说的冲击运动是指具有明确原点的任何非周期的决定过程(Детерминированный Процесс)(图1)。应将原点理解为冲击过程的起点,也就是说,当 $t \leq 0$ 时,表征运动特征的物理量(加速度、速度、位移)等于零,或者是将坐标系做相应移动后,这些物理量可取为零。在其他情况下,应将运动做为脉冲式振动来研究,研究冲击运动的方法通常不适于研究这种运动。

当系统受到一种定时发生的脉冲式冲击作用时,在作用之前,系统实际上处于非激励状态,这种具有脉冲特征的周期性过程也属冲击运动。

图2, α 曲线描述的是一脉冲输入函数 $x(t)$, 而输出信号 $y(t)$ 的曲线如图2, β 所示。当输入信号作用中止后,在 $t < T$ 的区间内,若 $|y(t)| < y_0$, 则该运动可能是冲击运动。对于

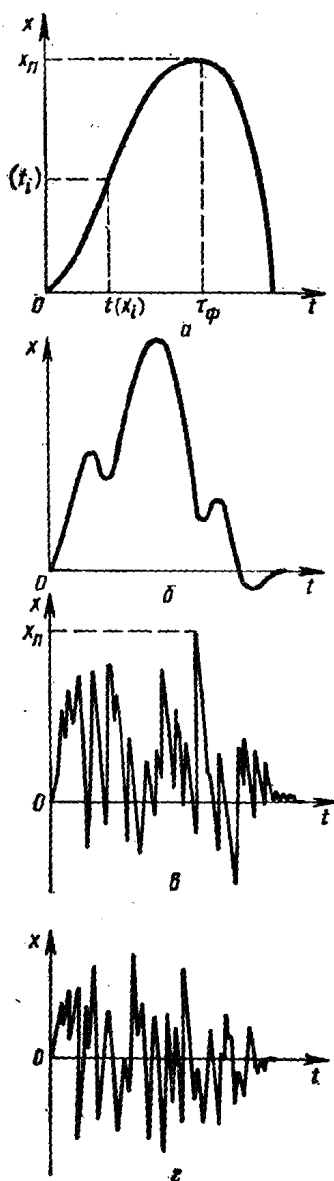


图1 冲击过程的波形图
 $a, б$ —普通波形; $в$ —叠加振动的脉冲波形; $г$ —叠加振动的无脉冲波形。

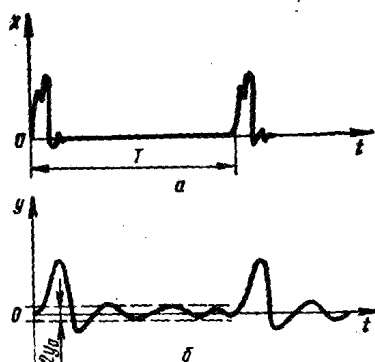


图2 脉冲过程的定义

满足这种条件的过程，可利用那些适用于分析瞬态过程的方法来确定系统的响应 $y(t)$ ，反过来说，也可根据系统对脉冲激励的已知响应来评定瞬态过程。

通常根据以下两种方法来区分各种冲击运动过程：

1) 按函数关系的波形——分为简单形式的过程(见图1, a 、 $б$)及复杂形式的过程。书中讲述了后一种情况中叠加振动的冲击过程(见图1, $в$ 、 $г$)；

2) 按被研究量关系的平均值或积分值 $I_x = \int_0^{\infty} x(t) dt$

(冲量——该式为这一术语的数学意义)——分为脉冲过程及无脉冲过程。对于具有不为零的 I_x 值的过程(见图1, a 、 $б$ 、 $в$)称

之为脉冲过程。有时也将脉冲机械冲击称为速度冲击，因为物体的加速度冲量等于速度的增加。对于函数关系的平均值或积分值为零的过程称之为无脉冲冲击或往复冲击（见图1，1）。

系统对冲击激励响应的突出特点是在输入作用结束后存在一输出信号（冲击后效效应）。

因此，可将响应分为同时响应与后效响应：同时响应是与激励同时产生的，而后效响应是激励作用过后才出现的。

1.1.2 动态测量的特点

冲击过程的参数测量是所谓动态测量的一种特殊情况，动态测量的任务是确定某些物理量的大小（范围）^[63]随时间及空间坐标的变化关系。

对机械运动最适用的特征量为：加速度、速度、位移及相对变形。在研究产生变形的固体运动时，尚需确定力、内应力及物体连续性的破坏特征；在分析液体和气体运动时，需确定内压力。最后，在某些情况下感兴趣的研究量是物体的机械阻抗及波阻抗之类的量。

具有密切相互联系的一组同类物理量形成物理场。

由于形成物理场的各量之间存在一定的联系，利用表达这种相互联系的关系式求出各量与时间的函数关系，根据这一关系就能求出所要求的量来，当然，这是一种间接方法。

研究函数关系要进行一系列的逐点（离散的）测量，每一测点都对应着一定的时刻 t_i 。离散测量的点数取决于测量装置确定该数的时间 τ_i 以及所容许的相对误差 δ 。

从这里可以看出，与静态测量相比动态测量的精度较低，这是为人共知的。由描述测量装置的普遍方程便可对静态测量误差 $\delta_{ст}$ 与动态测量误差 $\delta_{дн}$ 间的关系做定量估计^[140]

$$\frac{\delta_{дн}}{\delta_{ст}} = \sqrt{\frac{\tau_{изм}}{\tau_{н.н}} \cdot \frac{P_{ст}}{P_{дн}} \cdot \frac{\eta_{изм}}{\eta_{н.н}}} \quad (1.1)$$

式中 P ——因被测体而使测量装置所消耗的功率，瓦，

$\eta_e = W_{\text{ш}}/W_e$ ——能量效率，

$W_{\text{ш}}$ ——取决于热力学噪音的能量灵敏限，

W_e ——能量灵敏限。

下角《ст》及《п》分别表示静态与动态测量情况下的值。

对一些原始数据的典型组合来说， $\delta_n \approx 160\delta_{\text{ст}}$ 。实践证实这一关系式中的值其数量级是对的。

动态测量的另一特点是提出测量任务与分析测量结果有其更为复杂之处，如果研究不随时间与空间而变的量时，得到的是一唯一的测量结果，并可用来解决所提出的问题，而研究几个变量的函数关系时，通常要用一个或数个参数来表示测量结果，这时既要根据测量任务，也要根据某种测量方式实现的可能性来选择测量参数。测量数据的处理包括结果的误差分析与动态修正，要借助于所研究函数关系中各种参数的不同的关系式来进行。

在冲击运动参数的测量范围内，对于同时响应与后效响应有不同形式的计算式子，这点也是重要的。

这样一来，在动态测量领域中，测量实验的准备过程与进行过程就完全取决于在所研究关系中选择什么测量参数。因此，检定系统的形式也取决于测量参数的形式。因此，参数的多样性不可避免地使测量方法的种类以及相应的标准仪器的数量增多。从另一方面来说，为了使测量得到高精度和高可靠性，对每种具体情况需采取专门的途径去选择测量参数。

所有这些都给测量的准备过程与进行带来一些特殊的困难，归根到底，也就是需要研究出准备与进行测量实验的一定的方法，需要应用冲击运动测量参数测量技术的理论原理，需要具有大量的测量实验方法与相应的标准仪器。

1.2 表征冲击运动的关系式

1.2.1 冲击作用的解析近似表达式

某些系统可将所研究物理量间的函数关系进行变换, 在分析这类变换过程的实践中, 如象确定系统及其各环节的特性时, 通常将输入作用近似表达为几种理想函数, 这些函数具有较简单的解析表达式^[46, 85, 108, 202]。

在选取近似函数时应考虑:

a) 对于测量实验所主要测量的参数来说, 不论是原函数还是近似函数都应使该参数具有同样的值;

6) 近似函数与原函数的波形应十分近似。

估计波形近似精度的最简单的方法是相对均方根准则 λ_ϕ , 其定义为

$$\lambda_\phi = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{x_{n,i} - x_{n,i}}{x_{n,\max}} \right)^2}{n(n-1)}} \quad (1.2)$$

式中 $x_{n,i}$ 及 $x_{n,i}$ 分别为对应同一自变量值的近似波形与原波形的纵坐标值; $x_{n,\max}$ ——原波形的峰值; n ——计算中所取的纵坐标点数。

在求准则 λ_ϕ 时, 应选取原波形与近似波形上极值点所对应的纵坐标值, 应根据曲线的特点来确定选点数 ($n = 8 \sim 20$)。

若 $\lambda_\phi \leq 0.03 \sim 0.05$, 采用近似曲线, 在多数情况下是说得过去的。图3中给出的例子是某实验曲线与其近似曲线, 选定近似曲线时使二曲线的峰值重合, 且 $\lambda_\phi = 0.03$ 。

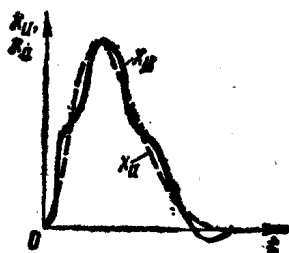


图3 冲击过程的原波形的近似表达

表 1

代号	近似函数		傅里叶谱		冲击谱 +YCT -YCT YCH
	示图号	解析式 ($0 < \theta < 1$)	幅值频谱的解析式	相位谱的解析式	幅值谱 示图号
11	图 4, a	$\text{Ges}(\theta, \xi) = x_n \frac{\sin n\theta}{\sin n\xi} \cdot \exp\left(\pi \frac{\xi - \theta}{\text{tg} n\xi}\right)$	$S_H(z_0) = \frac{x_n}{\pi} \sin n\xi \exp\left(\frac{\pi\xi}{\text{tg} n\xi}\right) \times \left[1 + 2\exp\left(-\frac{\pi}{\text{tg} n\xi}\right) \cos n z_0 + \exp\left(-\frac{2\pi}{\text{tg} n\xi}\right)\right]^{1/2} \cdot \left[(1 - z_0^2 \sin^2 n\xi)^2 + z_0^2 \sin^2 2n\xi\right]^{-1/2}$	$\varphi(z_0) = \arctg -A/B,$ $A = (1 - z_0^2 \sin^2 n\xi) \sin n z_0 \cdot \exp(b)$ $+ z_0 \sin 2n\xi \cdot [\exp(b) \cos n z_0 + 1],$ $B = (1 - z_0^2 \sin^2 n\xi) [\exp(b) \cdot \cos n z_0 + 1] - z_0 \sin n\xi \sin 2n\xi \cdot \exp(b),$ $b = -\frac{\pi}{\text{tg} n\xi}.$	图 5, a 6, a
	图 4, b				图 5, b 6, b
22	图 4, c	$x = x_n \sin n\theta$	$S_H(z_0) = \frac{2x_n}{\pi} \cdot \frac{\cos \frac{\pi}{2} z_0}{1 - z_0^2}$	$\varphi(z_0) = \left(\text{余数} \cdot \frac{1 - \frac{z_0}{2}}{2}\right) \cdot 2\pi$	图 5, c, d, e, f, g, h
23	图 4, i	$\text{Ges}k(\theta, k_H, k, n) = x_n k_H (\sin n\theta + k \sin 2n\theta)$ 当 $n = 2m + 0.5$ 时, (m 为整数) $k_H = \frac{1}{1 + k}$	当 $n = 2m + 0.5$ 时, (m 为整数), $S_H(z_0) = \frac{2x_n}{\pi} \cdot \frac{1}{1 + k} \cos \frac{\pi}{2} z_0$ $\times \frac{2n(2n + k) - z_0^2(1 + 2kn)}{(1 - z_0^2)(4n^2 - z_0^2)}$	$\varphi(z_0) = \left(\text{余数} \cdot \frac{1 - \frac{z_0}{2}}{2}\right) \cdot 2\pi$	图 5, d 6, d
	图 4, j				

46	图 4, e	$\text{Gec}(\theta, \xi) = x_H \frac{1 - \cos 2\pi\theta}{1 - \cos 2\pi\xi} \cdot \exp\left(2\pi \frac{\xi - \theta}{\text{tg}\pi\xi}\right)$	$S_H(z_0) = \frac{2x_H}{\pi} \sin\pi\xi \exp\left(\frac{2\pi\xi}{\text{tg}\pi\xi}\right) \times \left[1 - 2\exp\left(-\frac{2\pi}{\text{tg}\pi\xi}\right) \cos\pi z_0 + \exp\left(-\frac{4\pi}{\text{tg}\pi\xi}\right) \right]^{1/2} \cdot \{(4\cos^2\pi\xi + z_0^2 \sin^2\pi\xi) [(4 - z_0^2 \sin^2\pi\xi)^2 + 4z_0^2 \sin^2 2\pi\xi]\}^{-1/2}$	$\varphi(z_0) = \text{arctg} A/B,$ $A = \frac{z_0(L_1 - 1) + L_2 L_3}{M_1} + \frac{L_4[L_5(L_1 + 1) + L_4 L_3]}{M_2} - \frac{L_7[L_2 L_3 - z_0(L_1 + 1)]}{M_2},$ $B = \frac{z_0 L_3 - L_2(L_1 - 1)}{M_1} + \frac{L_4[L_5 L_3 - L_6(L_1 + 1)]}{M_2} + \frac{L_7[L_2(L_1 + 1) + z_0 L_3]}{M_2},$ $L_1 = \exp(b) \cos\pi z_0, \quad L_2 = 2c \text{tg}\pi\xi,$ $L_3 = \exp(b) \sin\pi z_0, \quad L_4 = 4z_0 \cos\pi\xi,$ $L_5 = 2\cos\pi\xi, \quad L_6 = z_0 \sin\pi\xi,$ $L_7 = (4 - z_0^2 \sin^2\pi\xi),$ $M_1 = 4\cos^2\pi\xi + z_0^2 \sin^2\pi\xi,$ $M_2 = (4 - z_0^2 \sin^2\pi\xi)^2 + 4z_0^2 \sin^2 2\pi\xi,$ $b = -\frac{2\pi}{\text{tg}\pi\xi}$	图 5, e	图 5, e
47	图 4, u	$x = \frac{x_H}{2} (1 - \cos 2\pi\theta)$	$S_H(z_0) = \frac{x_H}{2} \frac{\sin \frac{\pi}{2} z_0}{\frac{\pi}{2} z_0 \left[1 - \left(\frac{z_0}{2}\right)^2 \right]}$	$\varphi(z_0) = \left(\text{余数} \cdot \frac{1 - \frac{z_0}{2}}{2} \right) \cdot 2\pi$	图 5, u	图 5, u

代 号	近 似 函 数		傅 里 叶 谱		冲击谱 + YCT - YCT YCT
	示图号	解析式 ($0 < \theta < 1$)	幅值频谱的解析式	相位谱的解析式	幅值谱 的 示图号
58	图 4, κ	$\text{Geck}(\theta, k_H, k, n)$ $= x_H k_H \left[\frac{1}{2} (1 - \cos 2\pi\theta) \right.$ $\left. + k \sin 2\pi\theta \right],$ 当 $n = 2m + 0.5$ 时, 式中 m 为整数 $k_H = \frac{1}{1 + k}$	当 $n = 2m + 0.5$ 时, 式中 m 为整数, $S_H(z_0) = \frac{4x_H}{\pi}$ $\cdot \frac{1}{1 + k} \left[\frac{1}{z_0(4 - z_0^2)} \sin \frac{\pi}{2} z_0 \right.$ $\left. + \frac{nk}{4n^2 - z_0^2} \cos \frac{\pi}{2} z_0 \right]$	$\varphi(z_0) = \left(\text{余数} \cdot \frac{1 - \frac{z_0}{2}}{2} \right) \cdot 2\pi$	图 5, κ
	图 4, π	当 $n = 2m + 0.5$ 时, 式中 m 为整数 $k_H = \frac{1}{1 + k}$			图 5, π
72	图 4, M		$S_M(z_0) = \frac{2x_H}{\pi^2 z_0^2 \xi_1 (1 - \xi_2)} \left[(1 - \xi_2)^2 \right.$ $\times \sin^2 \frac{\pi}{2} z_0 \xi_1 - 2\xi_1 (1$ $- \xi_2) \sin \frac{\pi}{2} z_0 \xi_1 \times \sin \frac{\pi}{2} z_0 (1$ $- \xi_2) \cos \frac{\pi}{2} z_0 (1 - \xi_1 + \xi_2)$ $\left. + \xi_1^2 \sin^2 \frac{\pi}{2} z_0 (1 - \xi_2) \right]^{1/2}$	$\varphi(z_0) = \arctg A/B,$ $A = (1 - \xi_2) \sin \pi z_0 \xi_1$ $+ \xi_1 (\sin \pi z_0 - \sin \pi z_0 \xi_2),$ $B = (1 - \xi_2) (\cos \pi z_0 \xi_1$ $- 1) - \xi_1 (\cos \pi z_0 - \cos \pi z_0 \xi_2)$	图 5, M
	图 4, N	$\text{Gel}(\theta, \xi_1, \xi_2) = \begin{cases} x_H/\xi_1, & \text{当 } 0 < \theta < \xi_1 \\ x_H, & \text{当 } \xi_1 \leq \theta \leq \xi_2 \\ x_H \frac{1-\theta}{1-\xi_2}, & \text{当 } \xi_2 < \theta < 1 \end{cases}$			图 5, N
74	图 4, O				图 5, O
75	图 4, n				图 5, n
76	图 4, p				图 5, p