触觉的生物力学基础初探

刚 芹 果

(河北大学数学系，保定 071002)

摘要 本文利用皮肤和皮下结缔组织的变形性能，讨论触觉中心理物理学定律的力学基础.

关键词 触觉，生物力学，心理物理学定律

1 引 言

触觉是皮肤受到机械刺激而引起的感觉. 作为一种感觉，它满足刺激量和心理量之间的心理物理学定律，利用这一定律可以分析触觉的某些性质. 同时，皮肤受到刺激而产生的变形，可以根据皮肤及皮下结缔组织的力学性能进行分析. 在本文中，讨论这两种不同研究方法所得结果之间的联系.

2 基于生物力学的心理物理学定律

皮肤及皮下结缔组织的弹性本构关系为 [2]

$$T=(T^*+\beta)\exp[\alpha(\lambda-\lambda^*)]-\beta \tag{1}$$

α,β 为常数， T 为 Lagrange 应力， λ 为伸长比， T^*,λ^* 分别为 T,λ 的参考值. 于是，在外力作用下，皮肤接触面处的变形和所受外力之间的关系，可近似取为 (1) 的形式，不妨仍用 T 表示单位接触面积上的外力， $(\lambda-1)$ 表示接触面处的变形，则有

$$\lambda-1=\lambda^*-1-\frac{1}{\alpha}\ln(T^*+\beta)+\frac{1}{\alpha}\ln(T+\beta) \tag{2}$$

假设外力作用下的心理量 S 与 $(\lambda-1)$ 成线性关系，即

$$S=k(\lambda-1) \tag{3}$$

k 为比例系数. 从而由 (2) 和 (3) 式，得 S 和 T 之间的关系为

$$S=k(\lambda^*-1)-\frac{k}{\alpha}\ln(T^*+\beta)+\frac{k}{\alpha}\ln(T+\beta) \tag{4}$$

可见 S 与 T 成对数关系，这已为许多实验结果所验证 [1].

类似地，若采用本构关系

$$T=A(\lambda-1)^r \tag{5}$$

A,r 为常数. 由 (3) 式，可得 S 和 T 之间的幂律形式

$$S=k\left(\frac{T}{A}\right)^{1/r} \tag{6}$$

这与 Stevens 的表示形式相同 [1].

另外，如采用 (1) 式和 (5) 式相应的准线性黏弹本构关系 [2], 可得出文献 [3] 中考虑适应现象的心理物理学定律.

3 讨 论

Fechner 曾根据韦伯定律得出 S 和 T 之间的对数关系为 [1]

$$S=a+b\ln T \tag{7}$$

a,b 为常数. 比较 (4) 和 (7) 式可见，当 $b=\dfrac{k}{\alpha},\beta=0,a=k(\lambda^*-1)-\dfrac{k}{\alpha}\ln T^*$ 时，二者相同. 但由 (7) 式可知，当 $T\to0$ 时，有 $S\to-\infty$. 这表明， Fechner 对数律 (7) 有一定的局限性. 为了克服这一局限性，根据修订的韦伯定律 [1]

$$\frac{\Delta T}{T+d}=C \tag{8}$$

C,d 为常数， ΔT 代表差别阈限. 得出 S 和 T 之间的对数关系为

$$S=a'+b'\ln(T+d) \tag{9}$$

a',b' 为常数. 比较 (4) 式和 (9) 式可知， a',b',d 和 $k,\alpha,\beta,T^*,\lambda^*$ 之间有如下关系

$$\left.\begin{aligned}&a'=k(\lambda^*-1)-\frac{k}{\alpha}\ln(T^*+\beta)\\&b'=\frac{k}{\alpha},\quad d=\beta\end{aligned}\right\} \tag{10}$$

从而可知， d 和 β 相等，但是它们所代表的意义却不同. 式 (8) 中的 d, 是对辨别产生干扰因素的估计值 [1]. 而 (1) 式中的 β, 则是反映皮肤及皮下结缔组织力学性能的物理量. 它们的相等，给出了各自的一种新解释.

对于生物软组织，我们知道，本构关系 (1) 式和 (5) 式的适用范围不同 [2]. (5) 式适用于外力 T 较小的情况， (1) 式用于描述 T 较大时的力学行为. 从而可知，相应地，心理物理学定律 (4) 式和 (6) 式的适用范围也不同，即： (6) 式可用于分析

接触觉，(4) 式用于讨论压觉. 从而揭示了对数律和幂律之间的联系 [1].

还应值得注意的是，由 (3) 式可知，心理量 S 的改变是由于皮肤的变形而产生的. 这与触觉的位移梯度说一致 [1]. 同时，也验证了上述假设 (3) 式的合理性.

4 结 论

本文的讨论结果表明，从生物力学方面分析触觉的某些现象，是可行的. 这为触觉研究提供了又一方法. 利用该方法，还可以进一步讨论触觉的其它现象，如适应、两点阈等 [1].

参 考 文 献

1 赫葆源，张厚粲，陈舒永. 实验心理学. 北京大学出版社，1983

2 冯元桢. 生物力学. 湖南科学技术出版社，1986

3 刚芹果. 考虑适应现象的心理物理学定律及其在力学中的应用. 力学与实践，1994,16(2): 40-41

(本文于 1994 年 4 月 23 日收到)

接触问题的简化方法

董 海 张远鹏
(北京大学力学系，北京 100871)

摘要 本文基于一种合理的物理抽象，给出了一种计算接触问题的简化方法. 其实质是在接触物体之间填加低弹模的虚构材料，以此来消除接触问题的边界非线性，将工程中广泛存在的接触问题转化为一般性的力学问题. 这样可使问题得以简化，降低计算成本. 简单的验算表明方法是可靠的.

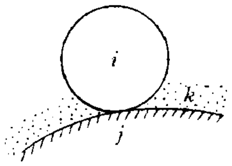
关键词 接触，接触问题，边界非线性，虚构材料

1 引 言

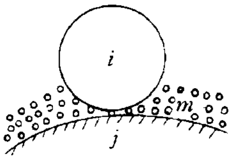
弹性力学中研究两接触物体受压力后产生局部应力和变形的问题统称为接触问题. 在接触问题中，接触体的变形和接触边界的摩擦作用使得部分边界随加载过程而变，且不可恢复，这种由边界条件的可变性和不可逆性产生的非线性问题，可称之为边界非线性问题. 如何处理这种边界非线性正是接触问题的难点. 目前，在解决弹性接触问题方面已广泛采用有限元方法，但用有限元方法无论是处理弹性还是非弹性接触问题，首先都需要编制专门处理接触条件的程序模块，一般计算公式都很复杂，计算量大，缺乏通用性，具体使用时也较麻烦. 本文设法通过消除接触问题的边界非线性而使问题得以简化.

2 计算接触问题的简化过程的描述

基于一种合理的物理抽象，本文拟采用下述简化方法来处理接触问题 (见图 1).



(a)



(b)

图 1

图 1(a) 的两接触物体 i,j 之间充满空气介质 k, 这是真实的接触状态，用此模型计算接触问题要考虑边界非线性. 发挥一下想象力，我们假设 i,j 并非接触而是通过空气介质 k 发生相互作用，现将空气介质换成另外一种弹性模量很低的物质 m, 如图 1(b). 我们将 m 也看成是一种材料，显然 m 材料在实际中并不存在，是一种虚构的材料. 在进行有限元计算时，可将 m 连同 i,j 一起剖分网格，然后输入计算机计算. 这样在非线性增量求解过程中，就不必考虑 i,j 物体由加载过程引起的接触边界的变化，因为现在 i,j 物体并没有直接接触，而是通过虚构的 m 材料发生作用，而 i,m,j 三者间的接