

生物力学未来研究的需要 (III)

美国生物力学委员会

6. 感 觉 系 统

6.1 引 言

人体感觉系统在形态上的多样性使我们有深刻的印象。这并不使我们感到意外，因为我们必须能够对从声音的到化学的，到电磁的，以至触觉的，这样广阔范围内的各种各样刺激作出反应。我们的每一样感官的重要性，以及它们的损伤所带来的困难，对于我们所有的人都是不言而喻的。值得注意的是，与描述我们每一种感觉系统的力学特性有关的许多问题，目前尚未得到解决。对于象高尔基腱器 (Golgi tendon apparatus) 和肌梭 (muscle spindles) 之类的机械性刺激感受器，以及化学感受器和温度感受器来说，尤其是如此。如同后面几页所述，甚至对于人们研究得最多的两个感觉系统，眼和耳，也还有一些基本问题没有解决。目前我们只有这两个感觉系统的某些组成部分的有限的宏观力学描述。我们没有非常好的细观力学描述，也不存在整个器官的精确的模型，而且对于与最常见病理情况有关的力学因素，也没有足够的了解。分析的模型并不是需要改进的唯一的方面，因为关于这些系统的功能的实验描述也很不完整。其原因与这些系统本身一样复杂，可能包括它们对创伤的敏感性，它们的相对的难以探查，以及它们功能作用范围的空间和时间尺度等。鉴于我们的感觉系统的重要性，而对于甚至是最常见的病理情况（例如耳鸣和老视等）都缺乏了解，并且有效的修复装置也很有限，因此，在感觉力学的领域里，生物力学工作者有很大的机遇作出重大的贡献。

下面几页概述听觉力学和视觉力学领域里提出的一些问题。由于这两个感觉系统的特性，我们把讨论分成两节。6.2 节讨论听觉系统，6.3 节讨论视觉系统。

6.2 听觉系统

听是我们人际交流的主要形式。它的丧失或受损，都可能使情感上受到极大的摧残。当某人丧失其听觉时，他将与他的家人和朋友隔膜起来。一个儿童如果具有未诊断出的听觉障碍，那他将非常可能被误认为是智力迟钝的。使儿童丧失听觉的最经常的原因是中耳炎（即一种中耳的感染）。根据美国科学院的报告，估计美国全部儿童中，至少有15%由于中耳炎而招致听觉丧失，严重到使他们在教育过程中显著发育迟缓（即至少落后15个月）^[11]。

在成人中，听觉丧失的较常见的原因之一与衰老过程有关。当我们年龄越来越大时，我们逐渐丧失我们分辨高频声音的能力，这种状况称为老年性耳聋（它影响美国2400万上了年纪的成年人的60%之多）。老年性耳聋的病因尚未搞清楚，不过，有一个因素是与听觉器官中组织的弹性性质的变化有关。另一个听觉障碍是耳鸣。这也没有什么已知的疗法，据1962—

1963年度美国卫生调查报告估计,美国成年人的20%有耳鸣,6%有严重的耳鸣^[9]。听觉丧失也由于遭受高强度噪声和长期中等噪声危害,头部创伤,以及中耳硬化病等而发生。所有这些原因都包含着力学的成分。很遗憾,生物力学工作者对耳科学的贡献还很有限。他们在这个领域中的最突出的贡献是:研制用于中耳重建手术的生物材料;设计助听器;研制诊断测量设备。最后这项的一个例子是 von Bekesy 听力计。但是,即使这些方面也仍然是非常活跃的研究领域。对于中耳修复术的情况,最近的一些工作集中于用生物玻璃(氟化物、磷酸钙等)制造的灵敏的陶瓷植入物。然而,仍需继续寻求生物相容性的材料,这种材料具有长期的稳定性,有助于声传导,还可防止高强度的声损伤。

过去15年间,在发展描述内耳中宏观运动的流体弹性模型方面作了广泛的努力。这包括耳蜗,由 Steele 和 Holmes 研究过,以及前庭器,由 Young, Van Buskirk 和 Grant 探讨过^[1,2,5]。他们相当成功地描述了内耳的宏观力学行为,不过仍然并不完全。例如,符合已知生理结构的耳蜗,其模型并未能够解释耳朵如何能够具有对极尖锐频率的分辨能力。因此,最近有些人正在观察可能有的的一种能动过程,此过程与力学的、电学的和化学的相互作用有关。不管这些研究能否解释尖锐声调的作用,显然,对感受器细胞力学变形的描述,以及它们如何作用于传导过程,对内耳的功能作用,都具有根本的重要性。也很明显的是,单有力学的描述是不够的,还必须把力学因素与化学因素之间的相互作用包括到模型中去。这是 Brownell 最近特别加以强调的,他发现了感受器细胞对于电刺激和化学刺激的能动性^[1]。

特别地,对内耳这个领域应提出的研究需要如下:

- 1) 描述毛细细胞的睫状束与周围流体及固体结构的相互作用。
- 2) 描述感受器膜的通道的特性,包括这些通道与感受器膜的应变及流体的化学组分的依赖关系。
- 3) 确定毛细细胞中的离子流,特别是钙流及其突触的活动。
- 4) 发展内耳中结构的纤维复合材料描述,估计由于声创伤、药物和病理状况引起的这些结构的性质的变化。

这样的工作将远远超过听觉系统的范围,因为已发现机械性刺激感受器遍布在人体中。例如它们包括皮肤感受器(承担触觉),肌梭中发现的感受器,以及高尔基腱器(与神经肌肉的控制有关)。

描述耳的力学性质所引起的另一个问题,是所使用的试验的侵入性质。在耳的功能的振幅范围,必须使用非常灵敏的测量技术如 Mossbauer 干涉测量法和激光干涉测量法等。Khanna 及其同事已经证明,这些方面并不可靠,因为它们会引起创伤^[6]。它们也不能用于临床。因此,为了能够获得耳蜗内运动的可靠测量数据,必须设计完全新型的测量设备。而在这个方面应该怎么作,还是一个未解决的问题。

值得注意的是,虽然外耳和中耳是比较容易探测的,但是,对于听觉系统的这一部分的本构模型建立工作,并未与内耳部分的工作并驾齐驱。对于这些系统所使用的模型,大部分只涉及电路网络的描述。因此,从结构和几何的观点来看,关于这些系统的工作是不完全的,并且对鼓膜、前锤骨韧带、鼓膜张肌等的本构模拟仍然必须进行。因此,对于中耳肌的功能仍然没有完全了解。此外,不同种类哺乳动物的中耳的结构有重大的差别,而对这些差别所起的作用并没有得到了解。这点很重要,因为常用动物模型来研究声损伤,但这些差别

却造成把这些结果外推到人耳的困难。总之，中耳这个特殊领域需要加以开展研究的课题如下：

- 1) 描述韧带和肌肉的几何特性。这包括评估哺乳动物的中耳的差别。
- 2) 小骨关节的完全的本构描述。这些小骨关节影响着能量的传递，并且也需要考虑它们在声防护方面的作用。

还有一些关于伤口愈合和组织再生等重要问题需要回答，例如有关用于修补撕裂鼓膜的移植物的性质需要了解。

关于外耳获取声信号的问题也仅仅部分地进行了研究。耳郭的主要功能之一是直接的定位作用，但是，它的卷曲形状即褶皱，目前甚至使得对这个问题求数值解也是不切实际的。因此，对这个领域已了解到的许多情况，主要是通过建立实验模型来获得^[1,2]。所以，描述耳朵的这一部分的力学特性的工作，仍然需要进行。

噪声招致听觉丧失。如何防止噪声的危害，是美国政府和工业界特别感兴趣的。这个问题已经研究了一个多世纪，在这个过程中了解了大量情况。然而，听觉受损、个人差异和声信号之间的关系，并未很好得到了解。例如，我们还不能确定在某一特殊噪声出现时可能发生的永久性听觉丧失。然而大家知道，在很宽频带的噪声中，首先丧失的频率往往是在4000 Hz 邻域内。有时把这称为声缺口 (acoustic notch)，为什么我们对这个特别的频率范围很敏感，这点并没有搞清楚，不过，据认为是由中耳的共振效应引起的。还有其他一些因素使听觉丧失的研究变得复杂。这些因素包括各人的年龄，药物和以前的医疗史。虽然目前采取了设备操作者认为必须的防护措施，但是，有关可以允许的噪声级的立法问题，却涉及重大的财经问题和人道主义问题，对这些问题，目前还没有足够的根据来予以回答。

6.3 视觉系统

眼睛是一个人观看世界的窗口。眼睛提供形状、距离、运动和颜色等信息给脑的视觉皮层。眼睛中能够对象的形成和分析起作用的特殊组织，有角膜，提供固定的屈光；晶状体，提供可变的屈光；视网膜，把象分解，供脑分析。由于眼睛的结构复杂，组成成分脆弱，所以它是先天性特别容易受损伤和发生功能性缺陷的。国立眼科研究所 (National Eye Institute) 估计，美国几乎有一半人屈光不正，需要矫正^[8]。此外，每年要作 100 多万个眼科手术，有 250 多万人眼睛受伤，其中的 40% 成为永久性损伤。这些损伤的大多数原因是机械性的。防止这种损伤，或者改进修补的方法，将有重大的影响。

晶状体的主要功能，是通过晶状体的厚度和曲率的变化，即调节作用，提供额外的屈光来在视网膜上成象。这种形状变化的性质由睫状肌来确定。睫状肌形成一个围绕晶状体中纬线的环圈，并且通过纤维与晶状体连接着。当睫状肌收缩时，晶状体上的应力减小，导致受控的弹性恢复。随着年龄的增大，晶状体的屈光作用减小，发生称为老视的情况。目前并不知道这种情况为什么发生和怎样发生，不过认为引起这种情况的原因多种多样：晶状体尺寸的增大，晶状体材料的变硬，睫状肌的萎缩，晶状体的脱水，晶状体蛋白的聚合，或这些因素中某几种的组合。近些年来已经着手进行调节作用和老视的某些模拟研究，最值得注意的有 O'Neill 和 Doyle 的工作，他们采用了薄壳变形分析；Koretz 和 Handelman 的工作，他们研究了对具有 (半) 已知各向异性弹性性质和已知变形的弹性体上应力分布的变化进行计算的逆问题^[6,7,10]。对晶状体囊也进行了研究，例如 Fisher 及其同事测量了晶状体囊的弹性

性质^[4]。

尽管有这些工作，关于人的晶状体的弹性性质，或者把力的变化从睫状肌传递到晶状体的纤维的弹性性质，仍然没有什么可靠的描述。事实上，我们对调节过程中晶状体-睫状体-脉络膜系统的无知是令人震惊的。仍然需要回答的问题的例子有：晶状体处的带状纤维与睫状环的连接点在什么地方？它们的每一条承受多大的载荷？晶状体起调节作用时其后部的运动有多大？什么是跨越脉络膜的压力差？这些问题的答案对于我们了解老视是至关重要的，而要得到这些答案，需要进行一些非常巧妙的实验。

最严重的眼睛疾病之一是青光眼，它影响着约120万美国人，并使其中约65000人失明。在大多数而不是所有的情况中，眼内液压的反常增大造成视网膜供血减少（这分别由身体的其余部分来调整），最终导致视神经和视网膜的萎缩。它的早期诊断取决于眼内压的精确测量，这通常通过分析承受载荷的角膜的变形来进行（眼压测量法）。这种方法的使用，以及它在测量眼内压时的精度，部分地取决于眼球的连贯的机能整体性力学模型，此模型同时包括对流体流动和组织变形的描述。在这方面，包括Schwartz, Mow, Woo, Collins, van der Werff, Taber等一批研究者对摘下的眼球进行的有限变形的研究，是一个重要的开端^[5]。

眼球的机能整体性力学模型也需要有关的其他视觉条件。例如，随着年龄的增大，玻璃体（晶状体和视网膜之间的流体）要变性。在中年以前，它是清澈的有高度结构的一种凝胶。但是到了40多岁的时候，它开始液化并失去其结构。有时这可能导致玻璃体的混浊，但是主要的危险是玻璃体成分与视网膜的粘连，以及当这些玻璃体成分收缩时将视网膜层撕裂。如果不予以治好，这种危险就可能局部导致视网膜变性。由于眼睛的创伤而引起的视觉丧失或受损，甚至是更为重要的事。与刺伤有关的问题是不言而喻的。不过，因为眼球是个相对说来体积不变的系统，所以对眼睛的一次简单的打击可能导致任何一种严重的，并且常常是不可逆的眼睛损伤。这些损伤包括视网膜的撕裂和/或脱离，晶状体的错位，以及眼睛的许多脆弱部分的出血。因此，不能低估建立眼睛的本构模型的重要性，但是，如同前面已指出的，目前这种建立模型的工作远远没有完成。

虽然已经讨论过的大部分视觉问题通常是不可逆的，但是，有许多另外一些问题可以通过使用修复术和/或矫正手术来成功地处理。关于前者的最常见一个例子，是采用接触镜来矫正屈光不正。接触镜有两种，硬接触镜和软接触镜，而当普遍采用时，两种镜片都仍然存在着与它们的使用有关的一些问题。例如，硬接触镜往往要重新整形或使角膜麻木。当这些问题是可逆的短期效应时，角膜对外部物体的敏感性的减小，将增加角膜严重磨损的机会。至于软接触镜，由于它们柔软和很薄，因而一般不能起矫正散光（角膜曲率不对称）的作用。此外，由于软接触镜与角膜表面的极其紧密的配合，所以它们必须控制好角膜组织下面的适当的水合作用和氧合作用（这是维持角膜的流体平衡和透明度所必需的）。研制和试验更好的聚合物来用于软接触镜，尤其是用于长期佩戴的软接触镜，是一个继续不断地进行的过程；同时，眼科医生建议佩戴周期应比眼镜制造厂家建议的短得多。

修复术的第二个重要用途是在白内障手术之后置换晶状体。美国每年有50多万个白内障手术，其中的90—95%用眼镜、接触镜或眼内晶状体植入物等方法成功地恢复了视力。在这些方法中，最有前途的是眼内晶状体植入物，它是在手术过程中将丙烯酸晶状体锚固在原来的晶状体的位置。较早的一些修复方法是用金属的或塑料的套环将晶状体直接锚固在睫状肌

上。这些锚固法的失败率相当高，往往在它们连接于其上的组织处撕裂，并且对于所使用的材料也有不利的反应。最近则是把晶状体植入物固定在晶状体除去之后的晶状体囊后部。看来，不管在寿命长短方面或是在植入物放置于视觉系统内的合适位置方面，这种方法的成功率都是较高的。不过，仍然需要有更好的置换材料，它能够得到锚固机构的长期稳定性，晶状体植入物的长期澄明度，以及总的化学惰性。目前，正在进行把水合聚合物置入晶状体囊内以代替晶状体和/或把流体注入晶状囊内的研究。然而，不管采用哪种方法，要置换晶状体，都要求对原来的晶状体的粘弹性性质和光学性质有所了解，对长期的后果、生物学上的惰性、功能上的等效代替等有所了解。

矫正手术，单独地或与修复置换相结合，用于有关角膜的治疗。最经常的情况是，当一个人的角膜或者由于患病或者由于受伤而不再具有其功能作用时，便进行角膜移植。此外，目前正在试验用塑料晶体进行有毛病的角膜的实验性置换。如同眼内晶状体的植入的情形那样，这种技术有两个主要的问题：人造材料的长期功能寿命；与其余巩膜连接的方法。对于由于角膜或其他因素引起的较重的屈光不正，对角膜的曲率进行修整变得更普遍起来。这方面最著名的例子是径向角膜切开术，即把角膜里的浅切口安排成径向形式，并与角膜上的眼内压相结合，对角膜进行修整。其他的技术包括对角膜的表面层或整个角膜进行修整，然后把原来的组织重新植入。由于这些手术的技术非常之新，所以它们的长期成功率或其他长期因素，还没有得到评价。然而，很清楚，对于所有这些方法来说，彻底了解角膜和巩膜的生物力学性质是至关重要的。

6.4 小结

从前面的讨论显然可见，对人体感觉系统的生物力学特性进行描述是至关重要的，但是还非常不完全。特别需要开展研究的一部分领域列举如下：

- 模拟 例子包括内耳的内淋巴液体，鼓膜，感受器膜毛细胞系统，眼睛的晶状体，小梁网，玻璃体。
- 创伤 包括脉冲性和周期性噪声的危害，撞击对眼睛的影响。
- 生物材料 目前仍旧是重要的问题包括：研制用于中耳的生物玻璃植入物，用于软接触镜的聚合物材料，套环的设计，眼内晶状体植入物。
- 修复术 这里的一个例子是需要研制全植入式助听器，它不能仅是一个简单的放大装置，而是还能够选择频率和强化响应。

以上仅仅是可以从生物力学的贡献获得好处的感觉力学领域的一些例子。这些贡献对于个人和对于社会的重要性都不应过分强调，希望它们将有

6.5 参考文献

- 1 Allen, J.B., Hall, J.L., Neely, S.T., and Tubis, A. (Eds.), *Peripheral Auditory Mechanisms*, Springer-Verlag, New York 1986.
- 2 de Boer, E. and Viergever, M.A. (Eds.), *Mechanics of Hearing*, Martinus Nijhoff Pub, The Hague, The Netherlands, 1983.
- 3 Collins, R. and van der Werff, T.J., *Mathematical Models of the Dynamics of the Human Eye*, Lecture Notes in Biomathematics, Springer-Verlag, New York, 1980.
- 4 Fisher, R.I., "The Elastic Constants of the Human Lens," *J. Physiol.*, 212, 1971, pp. 147-180.
- 5 Holmes, M.H. and Rubinfeld, L.A. (Eds.), *Mathematical Modeling of the Hearing Process*, Lecture Notes in Biomathematics, Springer-Verlag, New York, 1981.
- 6 Koretz, J.F. and Handelman, G.H., "Modeling Age-Related Accommodation Loss in the Human Eye," *Inter. J. of Math. Modeling: Special Issue on Adv. in Comp. and Modeling in Med.*, in press.
- 7 Koretz, J.F., Handelman, G.H., and Brown, N.P., "Analysis of Human Crystalline Lens Curvature as a Function of Accommodative State and Age," *Vision Res.*, 24, 1984, pp. 1141-1151.
- 8 National Advisory Eye Council, *Vision Research - A National Plan: 1983-1987*, U.S. Department of Health and Human Services, NIH Pub. No. 83-2469.
- 9 National Center for Health Statistics, "Hearing Status and Ear Examination: Findings Among Adults, United States, 1960-1962," *Vital and Health Statistics, Series 11, No. 32*, U.S. Department of Health, Education and Welfare, 1968.
- 10 O'Neill, W.D. and Doyle, J.N., "A Thin Shell Deformation Analysis of the Human Lens," *Vision Res.*, 8, 1968, pp. 193-206.
- 11 Stewart, J.M. and Downs, M.P., "Medical Management of the Hearing-Handicapped Child," *Hearing Disorders* (J.L. Northern, Ed.), Little, Brown, and Co., Boston, 1984, pp. 267-278.

机会做到能起重要的作用。

董务民译自: United States National Committee on Biomechanics,《Future Research Needs in Biomechanics》, Printed by Calspan Co., Buffalo, New York (July 1986): 20—23.

7. 泌尿系统和生殖系统

7.1 对社会的影响——泌尿、生殖和遗传工程

在上年纪的人和/或患了多种硬化症的晚期病人中,很大一个百分比的人会发生各种尿路问题。这些问题可能危及人的生命。生殖功能的紊乱,对于个人的计划生育和整个社会的人口控制来说,都有极大的重要性。就其对社会的影响来说,遗传工程目前刚刚处于实际发展阶段,但已经看出了有这样的可能性:能够一代代地传下去的遗传缺陷和生殖细胞变异可以得到纠正。其长期的社会后果可能是深刻而久远的。

7.2 未来的需要

7.2.1 尿道力学 尿道问题涉及流体力学和固体力学二者的耦合。最近几年来,流经弹性可瘪管的流动理论已经发展得十分完善。可是作为尿道疾病诊断和治疗的应用的基础,它还没有很好地建立起来。尿道系统的一些组成部分的解剖情况、静息弹性性质和主动行为,尚未在病人身上很好地确定或使之容易测量,成为诊断疾病的理论力学基础。需要进行研究工作,来对具有尿路出口梗阻或逼尿肌收缩无力的病人的分类提供实用的基础。

就修复的需要来说,一个重要的补充将是发展膀胱括约肌修复术。这种需要将在对一些病人的控制下进行。另一个可能有用的领域,是发展电刺激系统,这种系统将干预有关排尿的神经网络。这种设备可以用来抑制或排放尿流。泌尿系统功能的紊乱常常传给神经控制,或者与膀胱及尿道的力学系统相互作用。需要对这个系统进行更多的研究,以便精确描述交感神经控制单元及随意控制单元与泌尿系统的力学部分之间的关系。

在涉及生殖系统的力学中,有精子泳动和卵子通过输卵管系统运动的经典问题,它们对于通过可能的干预办法来找出生育控制方法仍然使人感兴趣,也有可能值得发展如输精管置换和可植入精液贮存器等修复术。收缩和射精机理的力学研究,以及在睾丸循环中血液流动的力学研究,也是威胁生殖系统的疾病在临床方面感兴趣的课题。

7.2.2 生殖过程研究中的生物力学 生物力学有许多途径已经或将要继续对了解生殖和繁殖能力的生物学作出贡献。这些贡献既对生殖过程的基础研究有影响,也对这种基础研究在诊断和治疗方面的临床工作有影响。在历史上,研究集中在配子运输的机理上:精子通过雄性生殖道和从授精的地方到受精的地方的机理;卵子从卵巢通过输卵管到子宫,并在那里发育的机理。现在有一些新的生物力学问题可能被确定和研究,它们包括受精本身以及雄性和雌性两方面遗传物质的结合等问题。

精子泳动在运输中起着极重要的作用。对其流体动力学的研究已经进行了30多年。当今普遍存在的低 Reynolds 数细长体理论,最初就是考虑到精子的运动而发展起来的。大部分研究是分析处理无限大范围牛顿流体中的运动。从生物医学上看,壁面影响是重要的。在这