

前庭器感受变速转动的动力学原理

韦京辰¹, 秦任甲²

1. 桂林医学院药理教研室, 广西 桂林 541001; 2. 桂林医学院数理教研室, 广西 桂林 541001

【摘要】虽然实验早已揭示,人能感觉到变速转动是由于变速转动使前庭器半规管内淋巴流动冲击其感受器而引起的,但至今未见有阐明其原理的完整的动力学理论体系。本研究目的在于构建起这一理论体系。本研究采用理论性研究方法,建立恰当的直角坐标系,揭示优弧具有的优势,引入一系列创新公式,从而实现预期研究目的。研究得出了前庭器半规管内淋巴流动的4条规律,即无流律、流向律、取向律和距离律。本研究的突出意义有:(1)首创所研究问题的动力学理论体系,促进生理科学发展;(2)为医学院校物理课结合讲授医学中的人体物理问题提供实例;(3)为纠正生理学教科书长期存在的相关错误提供理论依据。

【关键词】前庭器;变速转动;惯性力;内淋巴流动

【中图分类号】R339.16

【文献标志码】A

【文章编号】1005-202X(2018)03-0345-08

Dynamic principle of how vestibular organ feel the rotation of variable speed

WEI Jingchen¹, QIN Renjia²

1. Pharmacology Teaching and Research Section, Guilin Medical University, Guilin 541001, China; 2. Mathematical Teaching and Research Section, Guilin Medical University, Guilin 541001, China

Abstract: Though the previous experiments had revealed that the reason why human can feel the rotation of various speed is because the rotation of variable speed make the lymphocinesia in the semicircular canals of vestibular organ stimulate the corresponding sense organ, the relatively full-fledged dynamic theory system of dynamic which expounds the theoretical principles has not yet established. Herein the study aims to establish the theoretical system. The prospective purpose was achieved by adopting a theoretical research method, setting an appropriate coordinate system, revealing the advantages of the major arc and leading into a series of innovative formulas. The study reveals four rules of the lymphocinesia in the semicircular canals of vestibular organ, including (1) the rule of semicircular canals without lymphocinesia; (2) the rule of the direction of the lymphocinesia in the semicircular canals; (3) the rule of the relationship between the relative direction from the semicircular canals to the axis and the speed of the lymphocinesia; (4) the rule of the relationship between the distance from the semicircular canals to the axis and the speed of the lymphocinesia. It's the first time to expound how vestibular organ feel the rotation of variable speed through a dynamic theory system, which facilitates the development of physiological science. The established system also popularizes the use of theoretical research, which offers great help to the medical professionals to overcome numerous physical problems of human body and provides theoretical references for correcting the relative mistakes in the physiology textbook.

Keywords: vestibular organ; rotation of variable speed; inertia force; lymphocinesia

前言

前庭器是人类感觉变速转动的器官^[1-2]。前庭器由位于两侧内耳的各3个半规管组成。实际上每一半规管都可看作一个圆形管道回路,其中充满内淋巴(液体),本文把其简称为回路或半规管回路。回

路内壁有一感受器(由毛细胞组成)^[3]。

从如下3方面可知,前庭器感受变速转动的动力学原理至今未阐明。其一,各种生理学书的基本说法^[4]:头转动起始(加速)阶段,内淋巴因惯性而朝回路转动的反方向冲击感受器,使其兴奋,传至中枢,人就感觉头在加速转动;等速转动或静止时,内淋巴相对感受器静止,使其不受冲击而致前庭器无法感受匀速转动或静止;转动终止(减速)阶段,内淋巴又因惯性而朝回路转动方向冲击感受器,使其抑制,传至中枢,人就感觉头在减速转动。如此而言,似乎只有角加或角减速度在影响内淋巴冲击感受器强弱,

【收稿日期】2017-10-27

【作者简介】韦京辰,硕士研究生,副教授,研究方向:药理学,E-mail: taotao@glmc.edu.cn

【通信作者】秦任甲,教授,研究方向:医学物理教学,人体物理、血液流变学和物理教学改革,E-mail: qinrenjia@126.com

其实就连角加或角减速度如何影响都未说清楚,更未能揭示内淋巴冲击感受器强弱还受何因素影响,如何影响。其二,至今尚未能查找到有文献能全面、深入地阐明前庭器感受变速转动的动力学原理。其三,笔者还看到生理学书关于感受器何情况受内淋巴冲击最大,有5种互相矛盾的说法,很容易判断全都是错的。据此,笔者想到待研究的问题是:回路绕轴作变速转动引起内淋巴冲击感受器的强弱和方向与其转动角加或角减速度,到转轴的距离,和转轴间的夹角有何关系?看来人们对此问题的认识还只停留在对实验事实的陈述上,远未能上升到理论层面。对上述悬而未决的问题,笔者深感有研究解决的必要。

研究此课题的目的有4个。其一,构建起阐明人通过前庭器感受变速转动的动力学理论基础,以弥补其空缺,发展生理学、生物物理学科学理论。其二,在医学院校物理教师普遍主张物理课应结合讲授人体物理问题的当口,研究此问题就是为其课程内容改革提供急需的素材,为教师课堂讲授提供难得的实例。其三,为纠正生理学书籍中长期存在的相关错误提供动力学理论依据。其四,广大高等院校物理教师苦于缺少设备或找不到研究课题,难以开展科研,研究此问题就告诉他们医学中有许多人体物理问题可用理论性研究方法^[5]进行研究,为其科研指明出路。

本研究首先引入惯性力概念^[6],在此基础上论证两个基本问题:①半规管回路平面与转轴垂直时,其内淋巴所受惯性力大小(流动快慢,冲击感受器强弱)随回路到转轴的距离如何变化;②半规管回路到转轴的距离一定时,其内淋巴所受惯性力大小随回路平面与转轴之间的夹角如何变化。要求研究形成的动力学理论必须能回答两个问题,即是什么?为什么?

1 回路离轴越近内淋巴冲击感受器越强

1.1 惯性力

生理学书籍所述,回路变速转动时其内淋巴因惯性而冲击感受器,这是正确的。但用“惯性”这个概念开展复杂论证是不可能的,必须引入惯性力概念。所谓惯性力,是指一个物体或物体系作变速运动时,其中的任一部分所受的假想力。如人乘坐在车上,开动(加速)时人会向后仰,刹车(减速)时人会向前倾,好像受到力的作用,其实是物体具有惯性的必然表现——作相对运动。在加速运动的物体或物体系中任一部分所受的惯性力 F_i 的大小等于该部分

物体的质量 m 与物体或物体系加速度 a 的乘积,其方向与加速度相反^[7]。即:

$$F_i = -ma \quad (1)$$

当回路变速转动时,其内淋巴受惯性力作用,惯性力越大对内淋巴加速或减速越快,对感受器冲击越强。惯性力这个概念贯穿全文。

1.2 回路各段元内淋巴所受切向惯性力

设回路绕其外之轴,并在垂直此轴的平面上转动,如图1所示。如头前倾 30° ,外半规管回路(在水平面上)绕垂直轴转动就是一例。

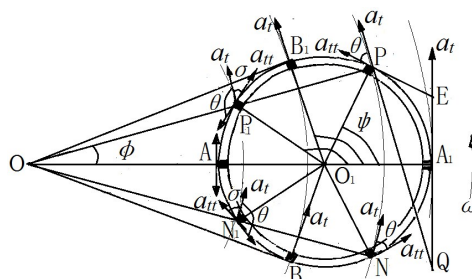


图1 回路绕垂直其平面的轴转动

Fig.1 Lymphocinesia rotating about the axis perpendicular to its plan

作用于回路内淋巴使其流动的惯性力是由回路绕轴转动的角加或角减速度所引起的。

下面讨论回路(图中双线圆所示)绕轴作圆周运动时各段元(可任意短)的加速度。设回路以轴垂直图面的交点O为圆心, β 为角加速度, ω 为角速度,作圆周(图中细弧线所示)运动。图中所示为转动的起始阶段,即 β 与 ω 同向,为加速转动。

显然,回路任一段元P都以 R 为半径, $R=OP$,作圆周运动,那其切向加速度 $a_t=R\beta$ ^[8],指向P段元的圆周转动方向。设P段元的 a_i 与该段元的逆时针切向之间的夹角为 θ 。显然 θ 就是任一段元的回路逆时针切向与圆周转动切向间的夹角。 a_i 沿该段元法向和切向的分量分别为:

$$a_n = a_i \sin \theta \quad (2)$$

$$a_t = a_i \cos \theta \quad (3)$$

下面讨论回路任一段元内淋巴所受切向惯性力。各段元的 a_n 都垂直该段元,亦即垂直回路,以致由它引起作用于内淋巴的惯性力也垂直回路,故而对内淋巴沿回路的流动无贡献。由各段元的 a_t 引起的作用于其内淋巴的惯性力 F_{it} 当然也沿该段元的切向,但 F_{it} 与 a_t 反向。设任一段元内淋巴的质量为 Δm ,由式(1)可知其所受切向惯性力为:

$$F_{it} = -\Delta m a_t = -\Delta m a_i \cos \theta = -\Delta m R \beta \cos \theta \quad (4)$$

式(4)适用于整个回路的任一段元。此式表明,回

路绕其外之轴并在垂直轴的平面上转动时,任一段元内淋巴所受切向惯性力与该段元到轴的距离,绕轴转动角加或角减速度,及其质量成正比,与 θ 有关。当加速转动时,如转动起始阶段, β 与 ω 同向, β 为正,式中 β 取正值;当减速转动时,如转动终止阶段, β 与 ω 反向, β 为负,式中 β 取负值。 Δm 、 R 恒为正值。

1.3 优弧与劣弧切向惯性力反向

如图1所示,过O作回路两侧的切线OB和OB₁,切点B、B₁分别把回路分为劣弧BAB₁和优弧BA₁B₁。

一个圆上任一点的切向有两个方向,或沿顺时针方向,或沿逆时针方向。本文规定,若一个圆上任意两点各有一矢量,当这两个矢量同沿所在点的顺时针切向或逆时针切向时,就说该两点的这两个矢量同向,否则就是反向。由式(4)可知,若能证明优弧与劣弧各段元的 $\cos\theta$ 符号相反,那优弧与劣弧切向惯性力反向这个命题就成立了。可以用两种方法进行证明:(1)以图证明。由图1可见,任一段元的 a_n 都是其 a_t 沿该段元的切向分量,故 a_n 必定指向与 a_t 构成锐角的切向。在优弧,与 a_t 构成锐角 θ 的切向是各段元的逆时针切向。而在劣弧,与 a_t 构成锐角 σ 的切向是各段元的顺时针切向。这表明,两弧各段元的 a_n 均反向, F_n 也反向。切点B、B₁段元的 σ 、 θ 均为 90° , $a_n=0$,这两点为 a_n 反向的分界点。(2)数学证明。把回路半径O₁A₁所重合于的圆周半径OA₁作为任一段元P的回路圆心角 ψ ,圆周圆心角 φ 的参照边, ψ 、 φ 的另一边分别为过P的回路半径O₁P、圆周半径OP。把垂直参照边的A₁段元沿转动方向的回路切向或圆周切向(两者重合)Qa₁作为参照方向。回路上任一段元的切向凡与参照方向一致的都为正切向(图1中为逆时针方向),反之为负切向;任一段元沿圆周的正切向都是其转动方向。

对AB₁A₁半回路进行论证。先论证AB₁A₁中的优弧部分。对任意段元P, $\angle OPO_1$ 与 θ 两边互相垂直,致 $\angle OPO_1=\theta$ 。 ψ 为 $\triangle OPO_1$ 的外角,故:

$$\psi=\varphi+\theta \quad (5)$$

$$\theta=\psi-\varphi \quad (6)$$

式(6)表明,任一段元P的 θ 就是该段元的回路圆心角与圆周圆心角之差。

P的回路正切向、圆周正切向与参照方向之间的夹角分别为 $\angle PEa_t$ 和 $\angle PQa_t$ 。由于 $\angle PEa_t$ 与 ψ , $\angle PQa_t$ 与 φ 的两边互相垂直,致 $\angle PEa_t=\psi$, $\angle PQa_t=\varphi$ 。这表明,任一段元的 ψ 、 φ 实质分别是该段元的回路正切向和圆周正切向的方向角, θ 就是该段元的回路正切向比圆周正切向偏离参照方向更多的角度。

再论证AB₁A₁中的劣弧部分。对任一段元P₁, $\psi=$

$\angle P_1O_1A_1$,是 $\triangle OP_1O_1$ 的外角,故 $\psi=\angle P_1OO_1+\angle OP_1O_1$ 。显然 $\angle P_1OO_1=\varphi$, $\angle OP_1O_1=\pi-\angle PP_1O_1$,据 $\angle PP_1O_1$ 与P₁的 σ 两边互相垂直,可知 $\angle PP_1O_1=\sigma$ 。故 $\angle OP_1O_1=\pi-\sigma$, $\psi=\varphi+\pi-\sigma$,由式(6)可得劣弧中:

$$\theta=\pi-\sigma \quad (7)$$

对ABA₁半回路进行论证。以参照边OA₁为轴,ABA₁半回路与AB₁A₁半回路各段元一一对称,如N与P、B与B₁、N₁与P₁对称。参照对AB₁A₁半回路的论证,不难证明凡对称段元的 ψ 、 φ 、 σ 和 θ 均分别相等。

上述论证表明,式(6)适用于回路的任何段元,而式(7)仅适用于劣弧各段元。在切点B、B₁,由图1可知 $\varphi+\angle OO_1B_1=90^\circ$, $\psi+\angle OO_1B_1=\pi$,代入式(6)可得 $\theta=90^\circ$ 、 $\sigma=90^\circ$ 。对优弧:A₁段元的 $\theta=0^\circ$ 。由数学可知,从A₁到B或B₁之间 θ 为单调增函数,其值必定为 $0^\circ<\theta<90^\circ$, $\cos\theta>0$,由式(3)和(4)可知 a_n 沿回路正切向,切向惯性力 F_n 沿回路负切向。对劣弧:A段元的 $\sigma=0^\circ$ 。由数学可知,从A到B或B₁之间 σ 为单调增函数,其值必定为 $0^\circ<\sigma<90^\circ$ 。由式(7)可得:

$$\cos\theta=\cos(\pi-\sigma)=-\cos\sigma \quad (8)$$

式(8)仅适用于劣弧。由式(8)可知在劣弧 $\cos\theta<0$,由式(3)和(4)可知 a_n 沿回路负切向,切向惯性力 F_n 沿回路正切向。这就证明,优弧与劣弧各段元的 a_n 反向, F_n 也反向。数学证明与以图证明结果完全一致。以图证明直观,数学证明严谨,各具优势。

1.4 回路内淋巴所受切向合惯性力

既然优弧与劣弧所有段元的内淋巴所受切向惯性力总是反向的,那内淋巴在回路内的流动方向、加速度大小、流速快慢和对感受器冲力强弱就取决于回路各段元所受切向惯性力的总和,亦即回路切向合惯性力 F_{in} 。为表述简便,设各段元(Δm)均等,为精确起见设各段元(Δm)尽可能小。

$$F_{in}=\sum_a -\Delta m R_a \beta \cos \theta_a + \sum_b \Delta m R_b \beta \cos \sigma_b \quad (9)$$

式(9)为本文的基本公式,前 Σ 为利用式(4)所得的优弧各段元切向惯性力之和,后 Σ 为式(8)代入式(4)所得的劣弧各段元切向惯性力之和。由式(9)可知,回路切向合惯性力就是优劣两弧各自切向惯性力总和之差。 a 、 b 分别为优弧和劣弧各段元的序号,其中, a 为 $1, 2 \cdots, n$; b 为 $1, 2 \cdots, j$ 。下面从两个方面证明绝对值前 Σ 大于后 Σ 。

其一,优弧优势之一是优弧比劣弧段元(Δm)数多。回路两切点B与B₁不会正好在与BB₁平行的直径两端,亦即BB₁不为直径。假定BB₁为直径,由于 $R_B=OB$ 和 $R_{B_1}=OB_1$ 是切线,那 R_B 、 R_{B_1} 必定与此直径垂直, R_B 、 R_{B_1} 则必定平行。这意味着转轴距离回路无限

远,回路的优弧与劣弧等长,两弧均为回路半圆。在实际生活中转轴到回路的距离是有限的,故 B 、 B_1 只能在与 BB_1 平行的直径近轴一侧。这样优弧必定长于劣弧,亦即长于回路半圆, $n>j$ 。优弧有 n 个 Δm ,劣弧有 j 个 Δm ,那优弧比劣弧多 $n-j=z$ 个 Δm 。

过转轴引直线分别交于劣弧、优弧的段元称为两弧对应段元,如图1中 P_1 与 P 、 A 与 A_1 、 N_1 与 N 互为对应段元。鉴于优弧的段元数多,所以对劣弧的所有段元,优弧都有其对应段元,共有 j 对对应段元。将式(9)前 Σ 记作 F_{itr} :

$$F_{itr} = \sum_{hb} -\Delta m R_{hb} \beta \cos \theta_{hb} + \sum_k -\Delta m R_k \beta \cos \theta_k \quad (10)$$

hb 为优弧中与劣弧对应的段元序号, h 与 b 取相同的数值,依次为 $1, 2, \dots, j$ 。 k 为优弧中比劣弧多的段元的序号,其取值为 $1, 2, \dots, z$ 。将式(10)代入式(9),并将式(9)中后 Σ 的加号改成两个连减号,可得:

$$F_{itr} = \sum_{hb} -\Delta m R_{hb} \beta \cos \theta_{hb} + \sum_k -\Delta m R_k \beta \cos \theta_k - \sum_b -\Delta m R_b \beta \cos \sigma_b \quad (11)$$

由图1可知, $\triangle PO_1P_1$ 为等腰三角形, P_1 、 P 的 a_n 、 a_t 分别垂直该段元的回路半径和圆周半径,依此可证明劣弧任意段元的 σ_b 都与优弧对应段元的 θ_{hb} 相等,为表达简便而统一用优弧对应段元的 θ_{hb} 替代 σ_b ,那上式可简化为:

$$F_{itr} = \sum_{hb} -\Delta m (R_{hb} - R_b) \beta \cos \theta_{hb} + \sum_k -\Delta m R_k \beta \cos \theta_k \quad (12)$$

因式(12)的 θ_k 都是锐角,那后 Σ 就是优弧比劣弧多的段元所产生的使优弧切向惯性力比劣弧大的那一部分。

其二,优弧优势之二是各对应段元优弧的圆周半径比劣弧的大。由图1可知,任意两个对应段元到转轴的距离,优弧的比劣弧的大,即 R_{hb} 比 R_b 大。式(12)前 Σ 正是由 $R_{hb}>R_b$ 而产生的使优弧切向惯性力比劣弧大的那一部分。

由以上论证表明,由于具有角度保障条件,即优弧 $0^\circ \leq \theta < 90^\circ$,劣弧 $0^\circ \leq \sigma < 90^\circ$,再加上优弧的两项优势,确保了优弧内淋巴所受切向惯性力比劣弧的大。这个结论的定量关系就是式(12)。式(12)右边除 β 有正负之分外,其余各量恒为正或0。这表明半规管回路平面垂直轴转动时,起始(加速)阶段,优弧各段元的 β 、 a_n 都是正的,与人体或优弧转动方向相同。由式(12)可知 F_{itr} 为负的,与人体转动方向相反。终止(减速)阶段,优弧各段元的 β 、 a_t 都是负的,与人体或优弧转动方向相反。由式(12)可知 F_{itr} 为正的,与人体转动方向相同。这与生理学书所说一致。这表明,不管数理推导多么复杂,只要每一步骤

都是科学的,结果必然正确。式(12)为本章的核心公式。

1.5 回路越近轴内淋巴受切向合惯性力越大

当回路离轴足够远时,回路内淋巴所受切向合惯性力为0。回路直径不过几个mm,若离轴足够远,两切线 OB 、 OB_1 将接近平行, BB_1 接近与其平行的直径重合,可认为优弧与劣弧均接近半圆而等长,优弧的优势之一几乎消失,可近似认为式(12)的 k 为0,后 Σ 为0;回路直径远小于回路各段元到轴的距离(圆周半径),以致可忽略优弧与劣弧各段元到转轴的距离(圆周半径)之差,从而可认为 R_{hb} 、 R_b 近似相等,优弧的优势之二也几乎消失,可近似认为式(12)中 $R_{hb}-R_b=0$,前 Σ 为0。这表明当回路离轴足够远时,优弧与劣弧的内淋巴所受切向惯性力绝对值几乎相等,以致回路切向合惯性力 F_{itr} 几乎为0。细分析式(9)、(11)也不难明了此时的回路切向合惯性力 F_{itr} 也近似为0。这意味着回路离轴足够远时,很难靠前庭器感受变速转动。

回路越近轴,其内淋巴所受切向合惯性力越大。这可阐明如下:(1)回路越近轴,使任一段元的 φ 越大,但其 ψ 不会因此改变,由式(6)可知 θ 越小,各段元的 $\cos \theta$ 越大而使式(12)的两个 Σ 均因此而越大;(2)回路越近轴,使两切点 B 、 B_1 越接近 A 点,优弧比劣弧越长, b 越小(对应段元对数越少),而 k 越大,式(12)后 Σ 越大,即优弧优势之一越强;(3)回路越近轴,使劣弧各段元越收缩靠近 A 点,这使对应段元优弧的离劣弧的越远,即对应段元间距离 $R_{hb}-R_b$ 越大,也就是优弧优势之二越强。

当回路趋于与轴接触时, B 、 B_1 趋于与 A 重合,优弧趋于整个回路,达到最长,而劣弧长度则趋于0,即劣弧消失,式(9)、(11)后 Σ 为0。鉴于劣弧消失,对应段元消失,连同“对应段元”这个概念也不复存在,相当于式(12)前 Σ 趋于0(即不复存在);回路所有段元的 a_n 、 F_{itr} 各自取向一致,使式(12)后 Σ 等于作用于整个回路内淋巴的切向合惯性力 F_{itr} 。因为劣弧不存在了,整个回路都成为优弧,故 k 获最大取值即回路 Δm 的总个数,于是式(12)变为:

$$F_{itr} = \sum_k -\Delta m R_k \beta \cos \theta_k \quad (13)$$

对于式(13)的情况,由式(6)或分析图1各段元 a_t 、 a_n 的取向可知, A_1 的 θ_k 为0,离 A_1 越远的段元 θ_k 越大,趋于 A 时 θ_k 趋于 90° 。

以上论证完成了两件事:一为以下论证奠定了理论基础;二论证了基本问题①。在回路绕其外的且垂直其平面的轴转动中,在相关条件不变情况下,回路离轴越近其内淋巴所受切向合惯性力越大,流

动加(或减)速度越快,冲击感受器强度越大;回路与轴接触时,其内淋巴受切向合惯性力、流动加(或减)速度、冲击感受器强度均最大。

回路面积很小,绕其内的轴转动几乎不可能,故对此不再赘述。

2 回路平面与轴夹角越大内淋巴冲击感受器越强

2.1 夹角为 0° 内淋巴所受切向合惯性力为0

回路平面与轴夹角是指回路(所在)平面与转轴之间的夹角,回路平面与轴平行时其夹角为 0° ,与轴垂直时,其夹角为 90° ,故此夹角在 0° 到 90° 间变化。为便于理解,将回路平面与轴夹角为 0° 分成回路平面不过轴两种情况进行讨论。

2.1.1 回路平面过轴 回路平面过轴(轴在其平面上)且绕轴转动时,无论回路段元离轴远近,其各段元的圆周必定在与该段元相交且垂直轴的平面上,圆周平面与回路平面垂直,圆周半径 R 分别为各段元到轴的距离且都在回路平面上。各段元的圆周切向加速度 $a_t=R\beta$ 必定与该段元的回路切向垂直,使 a_n 为0。由 a_t 引起的作用于内淋巴的惯性力也垂直回路各段元,对内淋巴沿回路流动无贡献。

2.1.2 回路平面不过轴 回路平面不过轴,意味着回路可离轴任意距离而与轴平行。这可以有两种情况,即回路平面与过轴平面正交于直径(这只当回路所处方向特殊时才能呈现)和回路平面与过轴平面斜交于直径(除回路平面过轴和回路平面与过轴平面正交于直径之外的所有平行轴的回路都是这种情况)。

(1) 回路平面与过轴平面正交于直径

回路平面与过轴平面正交于直径,这条正交的直径必定与轴平行,此直径称为平行直径。回路必定还有一条与平行直径垂直的直径,此直径称为垂直直径。此方位的回路各段元的转动圆周必定在与该段元相交且垂直轴的平面上,圆心为轴与圆周平面的垂足,其半径 R 分别为各段元到轴的距离。各段元的圆周切向加速度为 $a_t=R\beta$ 。同前一样,将任一段元的圆周切向(a_t 方向)与构成锐角的回路切向(a_n 方向)间的夹角记为 σ ,那沿任一段元的切向、法向加速度分量分别为 $a_n=a_t\cos\sigma$ 和 $a_m=a_t\sin\sigma$ 。 a_m 对内淋巴沿回路流动无贡献,只 a_n 有贡献。

垂直直径将回路分成上下两半,先讨论上半回路。在转轴位置看回路,垂直直径左右端段元平行于轴,亦即垂直于其圆周平面, σ 为 90° , $a_n=0$ 。从右端段元起,沿回路圆弧逐渐上升,各段元的回路切向依次越倾向于其圆周平面,使 σ 从 90° 逐渐减小,而 a_n 则逐渐增大。到平行直径上端段元,其回路切向与圆

周切向重合, σ 为 0° , a_n 最大等于 a_t 。此后,沿回路圆弧逐渐下降,各段元的回路切向依次越偏离其圆周平面,使 σ 从0逐渐增大,而 a_n 则逐渐减小。到垂直直径左端段元, σ 又增至 90° , a_n 为0。鉴于 $0^\circ \leq \sigma \leq 90^\circ$,故上半回路各段元的 a_n 转动起始阶段均沿转动方向,而终止阶段则沿转动反方向。

再分析下半回路。鉴于上下两半回路各段元相对于垂直直径是一一对称的。各对称段元相对于轴的位置、取向和 R 、 a_t 、 σ 、 a_n 以及由 a_n 引起的内淋巴所受切向惯性力都是对称的。这种对称性导致下半回路各段元的 a_n 在起始阶段均沿转动方向,在终止阶段则沿转动反方向。

由上面分析可知,上下半回路内淋巴所受切向惯性力大小相等方向相反,致使回路内淋巴所受切向合惯性力 F_{in} 为0,因而回路无内淋巴流动。

(2) 回路平面与过轴平面斜交于直径

除回路平面过轴和回路平面与过轴平面正交于直径之外就是这种斜交了,很普遍。下面采用两种方法论证:

方法一:设回路平面与过轴平面间夹角为 μ , $0^\circ \leq \mu \leq 90^\circ$, μ 就是回路的取向角。 $\mu=0^\circ$, $\mu=90^\circ$ 前两节已论证了。这里论证 $0^\circ < \mu < 90^\circ$ 情况。把回路分别投影到过轴平面上和垂直过轴平面的平面上,两个投影均为椭圆。显然,从理论上,两个投影的切向合惯性力的合成就是回路本身的切向合惯性力。不过由2.1.1和2.1.2(1)两节的论证可知,这两个投影的内淋巴所受切向合惯性力均为0。因此,与过轴平面斜交于直径的回路内淋巴所受切向合惯性力亦为0。

方法二:不管 μ 大小如何,总可以过回路一直径作垂直轴的平面,那此直径就把回路划分为上下两半。上下两半回路各段元都一一对称。参照2.1.2(1)节的论证可知,各对对称段元相对于轴的位置、取向和 R 、 a_t 、 σ 、 a_n 以及由 a_n 引起的内淋巴所受切向惯性力都是对称的。正是上下半回路各段元具有如此对称性,才导致从整个回路看上下半回路各段元的 a_n 是反向的,从而使其内淋巴所受切向合惯性力 F_{in} 为0。

2.1节的论证表明,凡回路平面与轴平行,不管回路平面相对轴取向何方位,其内淋巴所受切向合惯性力必定为0,内淋巴不会沿回路流动,感受器不受冲击。

2.2 夹角越大内淋巴所受切向合惯性力越大

2.2.1 回路方位的表达 如图2所示,II为回路平面,其上的圆示回路,其圆心为 O_1 。为讨论需要,以过回路直径方向 DD_1 分别作垂直轴的平面I和平行轴的平面III,这就构成两个互相直垂的参照(坐标)平面。以II、III间的夹角 ζ 表示回路平面相对参照平面III的

取向角。延展II与轴相交,可知 ζ 实际就是回路于轴的夹角。 $\zeta=0^\circ$ 回路平面与轴平行, $\zeta=90^\circ$ 回路平面与轴垂直。 $\zeta=0^\circ$ 的情况2.1节论证过了,下面将论证回路平面取向角为 $0^\circ<\zeta\leq 90^\circ$,即回路于轴夹角非 0° 的情况。以I上的 OO_1 (沿轴径向)作为参照线,以 γ 表示回路于I相交的直径相对参照线的取向, $0^\circ\leq\gamma\leq 90^\circ$ 。为便于把回路绕轴的转动看作是其在两坐标平面上投影转动的合成,把 γ 分成3种情况:① $\gamma=0^\circ$,即 DD_1 与 OO_1 重合;② $\gamma=90^\circ$,即 DD_1 与 OO_1 垂直(图2);③ $0^\circ<\gamma<90^\circ$,即 DD_1 与 OO_1 之夹角为锐角。下面逐一讨论。

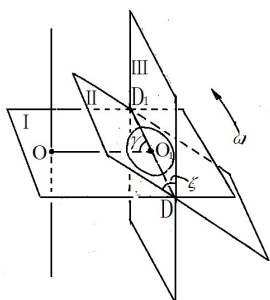


图2 回路平面与轴夹角非0

Fig.2 Lymphocinesia plan obliquely crossing the axis

2.2.2 回路投影长轴沿轴径向 本节将讨论① $\gamma=0^\circ$,即将图2中II、III及其交线 DD_1 在I上绕O转到使 DD_1 与 OO_1 重合的情况。此时 ζ 朝向读者,回路直径 DD_1 沿轴径向。回路在I、III上的投影均为椭圆,其长轴均与 OO_1 重合,半长轴均为回路半径 d ,半短轴分别为 $d\sin\zeta, d\cos\zeta$ 。在III上的椭圆投影平面过轴,由2.1.1节论证可知,此椭圆投影内淋巴所受切向合惯性力为0,故此时回路内淋巴所受切向合惯性力就是回路在垂直轴的平面I上的椭圆投影内淋巴所受切向合惯性力。

对于回路在垂直轴平面上的椭圆投影,长轴沿轴向径时,回路于轴夹角 ζ 越大,短轴越长,内淋巴所受切向合惯性力越大。下面证明使此结论成立的4个条件存在:

条件一, ζ 越大,短轴越长其优弧比劣弧越长。图3所示为几个不同短轴的回路椭圆投影。它们的长轴均为 AA_1 ,重合于 OO_1 ,短轴均在过 AA_1 中点 O_1 垂直 AA_1 的方向。图3如图1那样绕O在垂直轴平面上转动。过O作任一椭圆投影的两切线 OB, OB_1 ,两切线间的夹角为 α 。显然,短轴越短的椭圆投影 α 越小,其 BB_1 越逼近其短轴。设 D 很小,以致当 $\alpha\leq D$ 时可近似认为两切点B、 B_1 在其短轴的两端即 BB_1 近似与短轴重合,其优弧与劣弧等长,即两者长度之比

为1:1。反之,短轴越长的椭圆投影具有两个强项:一为 α 越大,两切点离其短轴两端越远,优弧与劣弧长度之比越大,当 $\zeta=90^\circ$ 时短轴与长轴等长,椭圆投影变成圆即为半规管回路本身,优弧与劣弧长度之比最大;二为周长越长,短轴越短的椭圆投影周长越接近2倍长轴,短轴越接近长轴的椭圆投影周长越接近 π 倍长轴,投影为圆时周长最大为 π 倍长轴。居于这两个强项可知,短轴越长的椭圆投影优弧比劣弧越长,短轴等于长轴即为圆时优弧比劣弧最长。

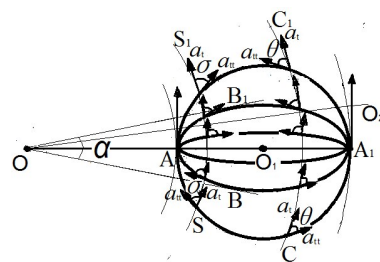


图3 回路在垂直轴平面上的投影

Fig.3 Lymphocinesia plan projected into the vertical axis plane

条件二, ζ 越大,短轴越长其优弧段元的圆周半径比劣弧的越长。过O作轴的任一径向直线 OO_2 ,分别与多个椭圆投影的优弧和劣弧的段元相交。由于短轴越长的椭圆投影越位于外边,使其与 OO_2 相交段元的圆周半径优弧越长,劣弧越短。圆形投影位于最外边,使其与 OO_2 相交段元的圆周半径优弧最长,劣弧最短。

条件三, ζ 越大,短轴越长的同一圆周的 θ, σ 越小。先论证优弧上的 θ 随短轴越长而越小。 CC_1 为绕O的优弧侧的任一圆周。仍以 A_1 段元的 a_1 为参照方向, AA_1 可看作短轴为0的回路投影, AA_1 上的相交段元的圆周切向与回路切向(沿 AA_1 方向)互相垂直, θ 最大为 90° 。由于短轴越长的椭圆投影越凸向上方和下方,对于 AA_1 上方的相交段元,其圆周切向总是在参照方向左侧越偏离参照方向,而其回路切向则总是在参照方向左侧越偏向参照方向,这就必然使这两个方向之间的夹角 θ 越小于 90° ;对于 AA_1 下方的相交段元,其圆周切向总是在参照方向右侧越偏离参照方向,而其回路切向则总是在参照方向右侧越偏向参照方向,这就必然使这两个方向之间的夹角 θ 越小于 90° 。同一椭圆投影上下对称段元的 θ 相等。最外面的短轴最长,与长轴相等,为回路本身,其上方和下方相交段元的 θ 最小。

再论证劣弧上的 σ 随短轴越长而越小。 SS_1 为绕O的劣弧侧的任一圆周,将与 SS_1 相交的各椭圆投影

段元的 σ 进行比较。由图3可见,椭圆投影短轴趋于0时回路投影趋于长轴,其上相交段元的 σ 趋于 90° 。随着短轴趋于最长即为最外面的圆,由1.4节的论证可知,回路劣弧段元的 σ 与其优弧对应段元的 θ 相等。这表明,当优弧 θ 从 90° 随短轴增至最长而减至最小过程中,劣弧的 σ 也从 90° 随短轴增至最长而减至最小。

由以上两段论证表明,条件三存在。

条件四,同一椭圆投影与短轴对称的段元 θ 总小于 σ 。为限制篇幅对此不详细论证,仅作提示性交代。任一椭圆投影相对短轴劣弧上的任一段元总可在优弧上找到其对称段元。为论证方便,规定A段元的圆周转动切向为劣弧的参照方向,A段元的回路切向与此方向相同。分别过两对称段元作其回路切向线和圆周切向线,与其参照方向相交,形成分别关联着 σ 、 θ 及其段元的回路切向角和圆周切向角的两个三角形。借助这两个三角形很容易证明不同短轴的椭圆投影(含短、长轴等长)对称段元的 $\theta < \sigma$ 。

当回路在垂直轴平面上的椭圆投影长轴沿轴径向时,其内淋巴所受切向合惯性力可用式(9)表示。也可将式(9)变为更易于理解的下式:

$$F_{\text{itr}} = \sum_{a_1} -\Delta m R_{a_1} \beta \cos \theta_{a_1} + \sum_b \Delta m R_b \beta \cos \sigma_b + \sum_{a_2} -\Delta m R_{a_2} \beta \cos \theta_{a_2} \quad (14)$$

其中,前 Σ 和中 Σ 分别包含优、劣弧中的所有 j 个对称段元,其序号 a_1 、 b 取相同数值 $1, 2, \dots, j$;后 Σ 包含优弧中除对称段元之外的所有段元,其序号 a_2 取值为 $1, 2, \dots, z$ 。 $j+z=n$ 为优弧总段元数。既然已证明上述4个条件均成立,那 ζ 越大,短轴越长, R_{a_1} 比 R_b 越大, θ_{a_1} 比 σ_b 越小,前 Σ 比中 Σ 的绝对值越大,后 Σ 的绝对值也越大,故而 F_{itr} 越大。结论证毕。

2.2.3 回路投影长轴与轴径向相交 就 γ 而言,上一节论证了① $\gamma=0^\circ$ 的情况,本节论证② $\gamma=90^\circ$ 和③ $0^\circ < \gamma < 90^\circ$ 的两种情况。这3种情况的回路在垂直轴平面上的椭圆投影长轴分别沿轴径向,与轴径向垂直,与轴径向成锐角。仿照①作出②和③的示意图,开展论证可以得出与①类似的结论。这里就不再详细赘述,捡要阐明其3点特性就可达到目的了。

其一,②③同①一样,短轴为0时椭圆投影变成其长轴,由图可知其切向合惯性力均为0,短轴很短其切向合惯性力均近似为0。其二,②③同①一样,短轴与长轴等长时椭圆投影变成回路本身,由图可知其切向合惯性力均为同一最大值。其三,短轴较短时,由图可知相同短轴的切向合惯性力①最大,③次之,②最小。短轴较长时,由图可知随着短轴

越长,①②③的 F_{itr} 越趋于相同最大值。

至此第2章的论证结束。乍看起来图2亦即①②③是特例,其实不然,无论回路取向何方,不是2.1节的情况,必然就是①②③之一,故第2章的论证包括了回路平面相对轴所取的一切方向。论证表明,当回路中心到轴的距离相同,转动角加或角减速度相同,回路轴之夹角从 0° 增加到 90° ,回路内淋巴所受切向合惯性力 F_{itr} 也随之从0增加到最大值。这个最大值就是回路平面与轴垂直时之值,无论回路相对轴取向何方,此最大值必然相同。

3 结论

通过上面两章的论证,可以归纳出无论回路相对轴为何距离,取向何方,其内淋巴所受切向合惯性力都在如下4条规律之中:

(1)回路无流律:回路在与轴平行(含过轴)的平面上或无论回路取向如何只要距离轴足够远,其内淋巴所受沿回路切向的合惯性力都为0,因而不会引起内淋巴沿回路的流动,不会对半规管感受器产生刺激。

(2)回路流向律:回路平面与轴相交时,其内淋巴所受切向合惯性力方向即流动方向为沿回路在垂直轴平面上之椭圆投影优弧切向加速度的反方向,即起始(加速)阶段沿人体转动的反方向,终止(减速)阶段则沿转动方向。

(3)回路取向律:人体转动角加速度、回路到轴的距离等相关条件一定时,回路平面与轴间夹角从 0° 起越大,其内淋巴所受切向合惯性力、流动加速度、对感受器冲击强度均从0起越大。当此夹角为 90° (回路平面与轴垂直)时,上述各量均达到此条件下的最大。

(4)回路距离律:转动角加速度、回路平面与轴间夹角等相关条件一定时,回路离轴越近其内淋巴所受切向合惯性力、流动加速度、对感受器的冲击强度均越大。当回路轴接触时,上述各量均达到此条件下的最大。

由结论(3)、(4)可知,当回路轴接触且其平面垂直轴时,其内淋巴所受切向合惯性力、流动加速度、对感受器冲击强度均达到在此时的角加速度下的最大。

关于旋转开始、终止阶段内淋巴的流动方向,回路流向律所指明的方向与Goldberg等^[9-10]、Minor等^[11]和Brichta等^[12]实验所揭露的方向一致。解剖学、生理学揭示人直立头向前倾 30° ,水平半规管平面与垂直轴垂直,由回路取向律可知此时绕垂直轴旋转,水平半规管感受器受到的刺激最大,而且此时

两垂直半规管平面与轴平行,由无流律可知两垂直半规管中无内淋巴流动。笔者查阅本院图书馆所有十几种生理学书(也有国外的)对何种情况感受器受刺激(冲击)最大,表述混乱且全都是错的,用本文构建起的动力学理论完全能纠正所有相关错误。回路距离律与人们在日常生活中的感受相一致,即半规管离轴越近(绕轴旋转半径越小)越容易头昏,表明感受器所受刺激越大,反之亦然。这就表明本文的理论论证所得结论是符合实验和生活事实的,论证是科学的,结论是正确的,所构建起的前庭器感受变速转动的完整动力学知识体系,填补了此问题只有极少实验事实,更无动力学理论的缺陷。

(本文是秦任甲教授2004年1月退休以来发表的第35篇论文)

致谢:2014年秦任甲在桂林医学院解剖学教研室多位教师指导下得以掌握前庭器基本知识开启本课题研究,徐庆教授为本文投稿出力,同济大学一年级学生黄泽宇为本文提供了宝贵意见,一并由衷感谢!

【参考文献】

- [1] 韩德民. 耳鼻喉头颈外科[M]. 北京: 中华医学电子音像出版社, 2010: 727-728.
HAN D M. Otorhinolaryngology head and neck surgery[M]. Beijing: Chinese Medical Electronics Audio and Video Publishing House, 2010: 727-728.
- [2] 吴彩琴. 内淋巴积水豚鼠前庭器的形态变化及外膜半规管力学建模与分析[D]. 上海: 复旦大学, 2012.
WU C Q. Morphological changes of vestibular organ in guinea pig with endolymph hydrops and biomechanical analysis of lateral semicircular duct [D]. Shanghai: Fudan University, 2012.
- [3] 李秀芝, 刘月顺, 李朝红, 等. 人内耳半规管和壶腹嵴的组织发生[J]. 解剖学杂志, 2003, 26(3): 266-269.
LI X Z, LIU Y S, LI C H, et al. Histogenesis of semicircular canal and crista ampullaris of human inner ear [J]. Chinese Journal of Anatomy, 2003, 26(3): 266-269.
- [4] 朱大年, 王庭槐. 生理学[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2013: 326-331.
ZHU D N, WANG T H. Physiology [M]. Beijing: People's Medical Publishing House, 2013: 326-331.
- [5] 秦任甲. 毕业论文与设计写作指导[M]. 桂林: 广西师范大学出版社, 2010: 1-4.
QIN R J. Guide for graduation thesis and design [M]. Guilin: Guangxi Normal University Press, 2010: 1-4.
- [6] 高炳坤, 漫谈惯性力[J]. 大学物理, 2011, 30(9): 22-24.
GAO B K. On the inertial force [J]. College Physics, 2011, 30(9): 22-24.
- [7] 漆安慎, 杜焯英. 力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1997: 80-81.
QI A S, DU C Y. Dynamics [M]. Beijing: Higher Education Press, 1997: 80-81.
- [8] 秦任甲. 医用物理学[M]. 第4版. 桂林: 广西师范大学出版社, 2014: 3-4.
QIN R J. Medical physics [M]. 4th ed. Guilin: Guangxi Normal University Press, 2014: 3-4.
- [9] GOLDBERG J M, FERNÁNDEZ C. Physiology of peripheral neurones innervating semicircular canals of the squirrel monkey. I. Resting discharge and response to constant angular accelerations [J]. J Neurophysiol, 1971, 34(4): 635-660.
- [10] GOLDBERG J M, FERNÁNDEZ C. Responses of peripheral vestibular neurons to angular and linear accelerations in the squirrel monkey [J]. Acta Otolaryngol, 1975, 80(1-2): 101-110.
- [11] MINOR L B, GOLDBERG J M. Influence of static head position on the horizontal nystagmus evoked by caloric, rotational and optokinetic stimulation in the squirrel monkey [J]. Exp Brain Res, 1990, 82(1): 1-13.
- [12] BRICHTA A M, GOLDBERG J M. The papilla neglecta of turtles: a detector of head rotations with unique sensory coding properties [J]. J Neurosci, 1998, 18(11): 4314-4324.

(编辑:谭斯允)