

文章编号:1004-7220(2012)04-0416-05

头盔质量和质心对军机飞行员颈部肌力的影响

贾晓红¹, 茆军兵¹, 王人成¹, 蒲放², 孙芳³

(1. 清华大学摩擦学国家重点实验室智能与生物机械分室, 北京 100084;

2. 北京航空航天大学生物与医学工程学院, 北京 100191; 3. 中国力学虚拟人应用与计算服务中心, 上海 200030)

摘要: **目的** 研究头盔质量和质心偏移对军机飞行员颈部肌肉活动特性的影响。**方法** 基于 AnyBody 软件平台建立头颈部肌骨模型, 包含 C0、C1-7、T1 和 136 组头颈部肌肉。采用集中载荷模拟头盔作用, 对不同头盔质量、质心位置和加速度载荷下的 7 个主要肌群的肌力进行了仿真计算。**结果** 当头盔质心与头部质心重合时, 支配后伸的头半棘肌、肩胛提肌、头夹肌和颈夹肌处于收缩发力状态。当头盔质量增大, 这些肌群肌力也随之线性增加, 并且加速度载荷对肌力增大程度起放大作用。头盔质心后移, 会降低后伸肌群的肌力, 增大前屈肌群受力。头盔质心左右偏移引起的附加侧弯力矩则会激活支配侧弯功能的肌群的活动。**结论** 头盔质量和质心位置对颈部肌群活动特性有明显影响, 本文建立的头颈部肌骨模型可以计算不同状态下肌力的变化, 头盔设计和使用过程可采用该技术进行定量分析。

关键词: 头盔; 头颈部; 肌骨模型; 肌力; 模拟; 加速度载荷; 军机飞行员

中图分类号: R 318.01 **文献标志码:** A

Effect of helmet mass and mass center on neck muscle strength in military pilots

JIA Xiao-hong¹, MAO Jun-bing¹, WANG Ren-cheng¹, PU Fang², SUN Fang³ (1. *Division of Intelligent and Biomechanical System, State Key Laboratory of Tribology, Tsinghua University, Beijing 100084, China*; 2. *School of Biological Science and Medical Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China*; 3. *Applications and Computation Service Center of CMVHuman, Shanghai 200030, China*)

Abstract: **Objective** To investigate the effect from helmet mass and deviation of mass center on neck muscle activity in military pilots. **Methods** Based on AnyBody software platform, a musculoskeletal model of head neck complex was established including C0, C1-C7, T1 and 136 muscles. Concentrated loads were applied to simulate the role of helmet. Strength from seven main muscle groups under different helmet mass, mass center and +Gz acceleration loads were simulated and calculated. **Results** When mass center of the helmet and the head coincided with each other, the muscle groups (such as semispinalis, levator scapulae, splenius capitis and cervicis) which took charge of extension were activated. Muscle strength increased with helmet mass linearly and +Gz acceleration loads would make this increase multiplied. Flexion muscle began to work when mass center of the helmet moved backward, so did the lateral bending muscles when mass center of helmet moved in the right-and-left direction. **Conclusions** Helmet mass and its center have an obvious influence on neck muscle activity in military pilots. The musculoskeletal model established in this paper can be used to calculate the change in muscle strength under different situations and conduct a quantitative analysis for helmet design and validation.

Key words: Helmet; Head-neck complex; Musculoskeletal model; Muscle strength; Simulation; Acceleration loads; Military pilot

收稿日期:2011-11-08; 修回日期:2011-12-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50975151), 摩擦学国家重点实验室自主研究项目(SKLT10B03)。

通讯作者:贾晓红, Tel: (010)62786853; E-mail: jiaxh@mail. tsinghua. edu. cn。

随着科学技术的发展和现代战争的需求,战斗机大速度巡航和高过载机动的特点日益突出。飞行员作为人机系统中相对薄弱的环节,其损伤防护从 20 世纪 80 年代起就引起了很多国家研究人员的重视。

人体颈部由颈肌、椎骨、韧带等组成,结构细小,承载力弱。颈部不仅是血管、气管、食管和脊髓等的通道,而且要保证头部相对躯干的运动。在高加速度(高 G)和高 G 增长率的飞行环境下,颈部损伤最易发生,而且损伤后果严重。

头盔作为飞行员必备的装具,对保护头颅起着重要的作用;但是头盔的重量增加了头颈部的负荷,已经成为影响战斗机飞行员颈部损伤的三大原因之一^[1-2]。尤其是随着头盔显示器、瞄准具、夜视仪等装置的使用,进一步加重了颈肌疲劳,不仅自身的耐受极限会降低,而且会削弱对颈椎的保护作用,更易引发颈部损伤。

自 1983 年瑞典空军开始头盔重量的影响研究以来,国内外开展了大量的理论分析和实验研究。有学者^[3-5]利用水平冲击加速器和垂直冲击实验塔进行了一系列实验,研究佩戴不同头盔时 +G_y 和 +G_z 作用下的颈部受力特性,结果表明头盔重量增加会加大颈部负荷,但是受试者的主观调整和头枕、安全带锁紧程度等也会导致头盔重量增大时颈部受力反而减小的现象。也有学者^[5-6]通过实验测量和 MADYMO 模型的仿真计算,定量研究了直升机撞击时头盔质量和质心位置变化对颈部受力的影响,根据 N_{ij} 预测了颈部损伤机率。Hamalainen^[7]基于肌电信号测量研究加速度载荷下颈部肌肉的活性和疲劳特性,结果表明头盔质量的增加会增大颈肌的张力,尤其是 +G_z 载荷下这种变化非常显著。吴明磊等^[8]利用 HybridIII 假人和志愿者进行了一系列弹射实验,测量了不同加速度下头盔对人体生物力学效应的影响。以上这些研究工作对确定头盔设计准则和损伤评价指标具有非常重要的指导意义。但是目前工作中还存在如下一些不足之处:(1)利用志愿者进行实验研究,不能对人体造成损伤,载荷大小和施加方式受到限制,也限制了载荷与肌力关系曲线的有效范围;(2)肌电信号测量只能获得表层肌肉的特性;(3)现有的仿真计算或者假人实验测量以颈部宏观力学特性为主,同时最关键的问题是没有考虑各个肌肉的不同作用^[8]。

鉴于正常飞行条件下的长时间作用的 +G_z 载荷不仅影响飞行员的健康,而且会增加颈部疲劳,进而降低飞行员操作的有效性,本文以 +G_z 载荷作用下的战斗机飞行员为研究对象,建立头颈部肌骨模型,仿真计算不同头盔质量和质心位置对颈部肌肉活动特性的影响。该模型也可以用于头部运动过程中或其他载荷作用下颈部肌力变化规律的研究。

1 头颈部肌骨模型

模型采用的人体数据基于我国军标 GJB4856-2003“中国男性飞行员人体尺寸”中规定的 50 百分位的歼(强)击机飞行员来建立,身高 170.4 cm,体重 68 kg,头部质量为 5.5 kg,转动惯量为 {314, 304, 190} kg·cm²。该模型可以进行比例缩放,以便于分析不同人群。

图 1 所示为基于 AnyBody 软件平台(AnyBody Modeling System, AnyBody Tech. Inc., 丹麦)建立的头颈部肌骨模型,主要组成元素为肌肉、头骨/椎骨(C0、C1~7、T1)、关节。

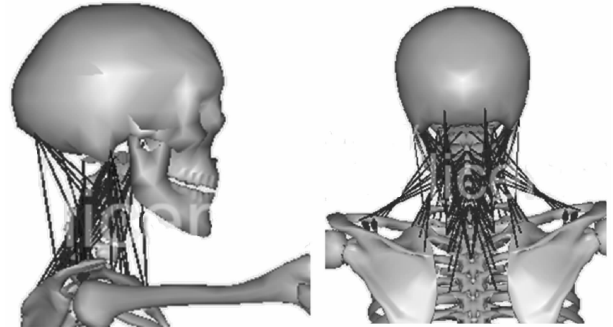


图 1 基于 AnyBody 平台建立的头颈部肌骨模型

Fig. 1 Musculoskeletal model of head-neck complex based on Anybody software platform

由于颈部肌肉数目多、结构复杂,力学特性参数难以获得。在此采用简单的肌肉模型,即通过定义的肌肉强度计算肌肉力,肌肉强度参数已得到验证^[9]。为了便于分析,将相同或邻近部位功能统一的肌肉称为一个肌群,本文主要讨论影响颈部疲劳和损伤的 7 个肌群:胸锁乳突肌(SCM)、斜角肌(SC)、头夹肌(SpCap)、颈夹肌(Spl)、肩胛提肌(LS)、头半棘肌(SsCap)、颈半棘肌(Ssp)。肌群的肌力近似为所包含肌肉肌力的合力。同时,模型考虑 C0、C1~7、T1 之间的相对运动,通过定义关节自

由度来模拟,除了 C0 ~ 1 之间只存在屈伸运动、C1/2只存在扭转运动外,其他相邻椎骨之间存在屈伸、侧弯和扭转 3 个自由度。

T1 为模型的固定坐标系参考原点。针对 +Gz 加速度载荷作用下,头部在中立位维持动态平衡的典型工作状态,利用头颈部肌骨模型,研究头盔质量和质心位置对颈部主要肌群肌肉活动特性的影响。

根据已有文献的阶段性研究成果^[10],确定加速度载荷、头盔质量、质心位置的考察范围。+Gz 加速度载荷通过设置模型中的场加速度来实现,取值 1 ~ 3 g;头盔质量通过集中载荷来模拟,载荷大小取决于头盔质量和加速度大小,载荷施加点反映头盔质心位置的变化。头盔质量 $m_h = (1.0 \sim 3.0) \text{ kg}$,质心位置相对头部质心坐标系沿 x 轴从后向前或沿 y 轴从右向左移动: $x = (-40 \sim 60) \text{ mm}$, $y = (-40 \sim 40) \text{ mm}$ (+Gz 作用下,头盔质心沿 z 轴垂直方向变化不影响颈部肌肉受力,不在本文讨论范围)。

在已知头部运动数据和外力大小的基础上,利用肌骨模型求解肌力,还必须依赖优化方法来解决肌力数目大于肌骨模型自由度带来的冗余问题。本文采用 AnyBody Modeling System 中提供的肌肉活动度最大/最小模型;该模型基于肌肉疲劳与其活动度直接相关的假设,认为肌力分配遵循最大活动度最小优化准则,保证最小疲劳程度。

优化模型为:

$$\left. \begin{aligned} \min G(F^M) \\ G(F^M) = \max(A_i^M) = \max\left(\frac{F_i^M}{N_i}\right) \\ CF^M = R \\ 0 \leq F_i^M \leq N_i, \quad i = 1, 2, \dots, n^M \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: F^M 为肌肉力, N_i 为肌肉强度,等于肌肉最佳长度下所能提供的最大力, A_i^M 为肌肉活动度,等于肌肉力与其强度的比值, C 为系统系数矩阵, R 为系统所受外力, n^M 为模型中肌肉数目。

肌力的大小反映了肌肉在身体运动或者姿态维持中所发挥的作用,是评价肌肉的疲劳和损伤的基础依据。利用头颈部肌骨模型,可以定量研究头盔质量和质心位置变化对颈部主要肌群肌力的影响,为头盔设计和颈部损伤评价提供规律性指导。为了描述肌力受外界因素的影响程度,定义

$$\delta_F^i = \frac{F^i - F_0}{F_0} \times 100\% \quad (2)$$

表示某状态下 i 肌群的肌力 F^i 相对于参考状态下该肌群肌力 F_0^i 的变化幅度。参考状态为 $m_h = 2.0 \text{ kg}$ 、+Gz = 1 g,头盔质心与头部质心重合。

2 结果

以 $m_h = 2.0 \text{ kg}$ 、+Gz = 1 g、头盔质心与头部质心重合的情况为例,图 2 给出了头部保持中立位动态平衡状态下颈部 7 个主要肌群肌力的大小。由于结构和外力均对称分布,在此只给出单侧的肌肉特性,另一侧对称分布。由于头部质心和头盔质心在矢状面内位于寰枢关节前方,头部自重和头盔产生前屈力矩,为维持头部中立平衡,支配后伸的头半棘肌、肩胛提肌、头夹肌和颈夹肌被激活,产生较大肌力。

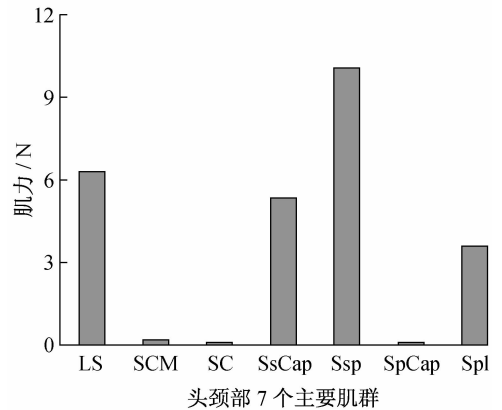


图 2 基础参考状态下头颈部主要肌群的肌力
($m_h = 2.0 \text{ kg}$ 、+Gz = 1 g,头盔质心与头部质心重合)

Fig. 2 Muscle strength of the head-neck complex under basic case

当加速度载荷和头盔质量变化时,颈部受力改变,肌肉激活程度会进行相应的改变以保证头部仍能保持中立位动态平衡。图 3 所示以头半棘肌为例,讨论加速度载荷和头盔质量对肌力的影响程度和规律。其他肌肉具有相同的变化规律,但其他肌群肌力受加速度和头盔质量的影响程度有所不同。随着加速度载荷和头盔质量的增加,肌力近似线性增加。由于头盔质量相对头部质量较小,故肌力随头盔质量变化的幅度较小,加速度载荷对肌力影响程度相对较大。加速度载荷的增加,对头盔质量的

影响程度有着明显的放大作用。

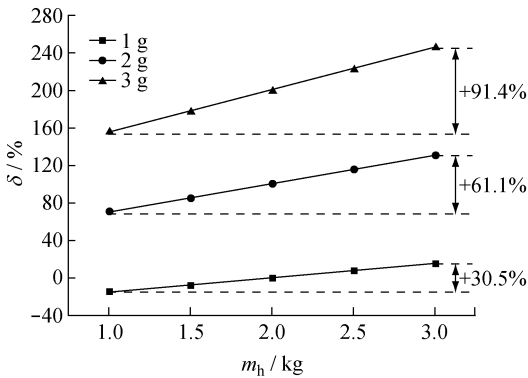


图3 头盔质量和加速度载荷对肌力的影响(头半棘肌为例)

Fig.3 Effect of helmet mass and acceleration load on muscle strength

头盔质心变化直接影响作用于寰枢关节的力矩,进而改变颈部肌群的力系分布。当质心沿着前后方向从后向前移动时,头盔所产生的附加力矩从后伸力矩逐渐减小,减至0后转换为前屈力矩,并随着质心前移逐渐增大。由于头部质量大于头盔质量,头部产生的前屈力矩起主导作用。图4所示为 $m_h = 2.0 \text{ kg}$ 、 $+G_z = 1 \text{ g}$ 时头盔质心分别沿前后和左右方向移动时胸锁乳突肌SCM和头半棘肌SsCap的肌力变化曲线。这两个肌群分别支配前屈和后伸功能。

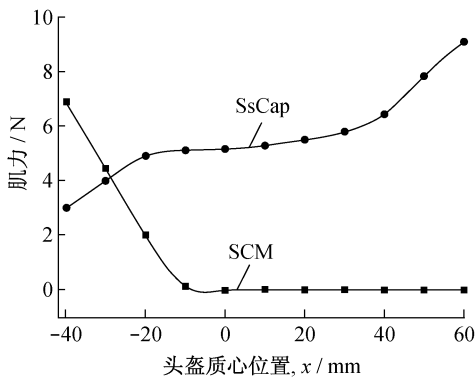


图4 头盔质心前后移动时对肌力的影响(胸锁乳突肌和头半棘肌对比示例)

Fig.4 Changes in muscle strength of SCM and SsCap when mass center of helmet moved in the fore-and-aft direction

时,在原有的前屈力矩基础上产生附加的侧弯力矩。图5给出了 $m_h = 2.0 \text{ kg}$ 、 $+G_z = 1 \text{ g}$ 时,左右两侧的胸锁乳突肌SCM的肌力随质心位置变化的曲线。SCM支配前屈和同侧侧弯功能,当头盔质心移动至某一侧时,对侧的SCM会产生肌力平衡头盔带来的附加力矩,以保证头部中立位。

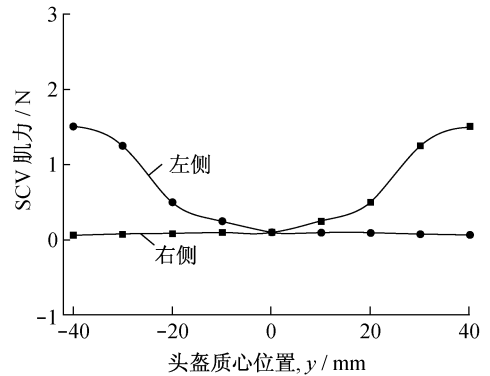


图5 头盔质心左右移动时对肌力的影响(胸锁乳突肌为例)

Fig.5 Changes in muscle strength of SCM when mass center of helmet moved in the right-and-left direction

3 讨论

军机飞行员所处的航空动力学环境容易导致飞行员颈部损伤,根据对我军1924名飞行员的调查显示,飞行加速度、飞行日留空时间、头盔质量是影响飞行员颈部损伤的3个主要因素^[1]。前两者源于飞行任务的要求,难以避免;而头盔质量可以通过合理的设计将其影响降到最低。

头盔在提高武器装备性能和战斗力的同时,也给飞行员带来不利的影 响。头盔质量增加、质心偏离头部质心、质量惯性矩增大等都更容易引起颈肌疲劳,不仅降低操作的有效性,而且削弱了对颈椎的保护,增加了颈部急性损伤的机率。

头颈部结构复杂,136组肌肉协同工作维持头部姿态平衡和三维运动。虽然关于人体生物力学的研究,可以借助于尸体实验、事故分析、假人实验,但是由于肌肉的力学特性,这些方法都无能为力。同时因为目前没有有效的肌力测量手段,肌电信号测量也只能从一定程度上反映表层肌肉的活动特性,故对颈部肌肉系统的全面的定量研究,只能采用计算机仿真技术。

AnyBody软件系统根据人体测量学数据建立人

当头盔质心沿着通过头部质心的y轴方向移动

体骨骼肌肉系统模型,基于逆向动力学分析,仿真计算模型中各骨骼、肌肉、关节等的机械力学特性。本文建立的头颈部肌骨模型,包括了头颈部主要的骨骼和肌肉,通过定义头部约束模拟中立位平衡位置。模型中采用肌肉参数由 AnyBody 系统提供,已经得到了文献和实验验证。采用的肌肉活动度最大/最小优化模型,基于最小肌肉疲劳的假设,适用于模拟长时间受力的研究。

正常姿态下,人体头部处于微屈状态。为保持头部中立位,支配后伸的肌肉发力以保持平衡。当佩戴头盔后,若头盔质心与头部质心重合,头盔质量会引起前屈力矩的增大,但受力模式不变。从图2、3也可以看出,此时主要都是支配后伸的肌肉在收缩发力,而且随着头盔质量增加,肌力会线性增加。飞行员在 +Gz 环境下,加速度载荷进一步加剧了肌力的增大程度。

当头盔质心与头部质心不重合时,头盔质量产生的力矩也会相应改变。当头盔质心沿着前后方向移动时,若其位于头部质心前方,头部和头盔产生的合力矩为较大的前屈力矩,原肌力随着质心前移逐渐增大。若其位于头部质心后方与寰枢关节前方之间的区域,力矩仍为前屈,肌肉发力模式不变。但当头盔质心继续后移,头盔质量产生的力矩则会变为后伸力矩,原有的支配后伸的肌肉肌力会快速减小,而同时支配前屈的肌肉开始收缩发力(见图4)。当质心沿左右方向移动时,会产生附加的侧弯力矩,支配侧弯的肌肉处于收缩发力状态。

头盔的设计、鉴定、管理和使用部门等都需要迫切指定头盔的质量特性标准,作为产品设计的依据。但能建立标准的前提是需要掌握头盔质量增加和质心偏移人头重心给人体带来的损伤模式和耐受极限。

飞行员所受载荷包括正常飞行条件下长时间低加速度载荷(1~2 g)作用和短时间高加速度冲击载荷。前者引起颈肌疲劳、颈部僵直疼痛、椎间盘慢性退变等,后者则会造成肌肉拉伤、撕裂、骨折甚至死亡等。前者作用的长期积累会降低颈部的强度,从而增加后者急性损伤的机率。

除了加速度载荷外,飞行员颈部损伤不同于其他职业的另外一个特点是头部运动。飞行过程中,飞行员头部保持灵活的三维运动,尤其是扭转。运动和加速度载荷的复合作用改变了颈部的损伤特性。

本文的重点在于建立头颈部模型,并对头部处于中立位这种基本状态,讨论头盔质量和头盔质心偏移对颈部肌肉受力特性的影响。在后续工作中,将利用头颈部肌骨模型,研究头部运动和加速度载荷复合作用下颈部的生物力学响应。同时开展肌电信号测量实验,对表层肌肉的活动特性进行验证。

参考文献:

- [1] 柳松杨,丛红,王鹤,等. 军机飞行员的颈部损伤研究[J]. 医用生物力学, 2010, 25(4): 262-265.
Liu SY, Cong H, Wang H, *et al.* Study on neck injuries in military pilots [J]. J Med Biomech, 2010, 25(4): 262-265.
- [2] 成海平,李交杰,季思菊,等. 空军飞行员颈肌强度的研究[J]. 医用生物力学, 2011, 26(1): 34-38.
Cheng HP, Li JJ, Ji SJ, *et al.* Research on cervical muscle strength in air force pilots [J]. J Med Biomech, 2011, 26(1): 34-38.
- [3] Chris P, John B, Erica D, *et al.* The effects of variable helmet weight on head response and neck loading during lateral + Gy impact [C]//SAFE Association 41st Annual Symposium. Jacksonville, USA: [s. n.], 2003: 88-95.
- [4] Perry CE. Effects of headrest position and helmet weight on human dynamic response during +Gz impact acceleration [J]. SAFE J, 2003, 31(1): 1-12.
- [5] Erica D, Steve M, John B. The effects of variable helmet weight and subject bracing on neck loading during frontal -Gx impact [C]//SAFE Association 42nd Annual Symposium. Salt Lake City, USA: [s. n.], 2004: 186-192.
- [6] Glenn P, Edwin. Influence of added head mass properties on head/neck loads during standard helicopter impact conditions [C]//60th Annual Forum of American Helicopter Society. Baltimore, USA: [s. n.], 2004: 1490-1510.
- [7] Hamalainen O. Flight helmet weight, +Gz forces, and neck muscle strain [J]. Aviat Space Environ Med, 1993, 64(1): 55-57.
- [8] 吴明磊,马春生,刘威,等. 弹射时装显示器头盔对人体的生物力学效应[J]. 中华航空航天医学杂志, 2005, 16(4): 267-271.
- [9] 郝卫亚. 人体运动的生物力学建模与计算机仿真进展[J]. 医用生物力学, 2011, 26(2): 97-104.
Hao WY. Advances in biomechanical modeling and computer simulation of human movement [J]. J Med Biomech, 2011, 26(2): 97-104.
- [10] de Zee M, Falla D, Farina D, *et al.* A detailed rigid-body cervical spine model based on inverse dynamics [J]. J Biomech, 2007, 40(S2): S284.
- [11] 吴明磊,卜伟平. 飞行员头盔重心要求[J]. 中华航空航天医学杂志, 2008, 19(2): 138-144.