

文章编号:1002-2082(2007)01-0109-06

# 不同因素对可调节人工晶体屈光调节力的影响

朱海丰, 方志良, 刘永基, 张昊

(南开大学 现代光学研究所 光电信息技术教育部重点实验室,天津 300071)

**摘要:** 首先以Hwey-Lan Liou眼模型为基础,根据等效性原则,保持该眼模型中自然晶状体屈光度不变,对无穷远点成像。然后利用ZEMAX实现光线追迹的方法,将自然晶状体替换为可调节人工晶状体(accommodative intraocular lens, AIOL),结合对人眼成像质量影响的分析,研究了AIOL在眼内的移动度、材料、中心厚度、结构、光学面非球面性等因素对其屈光调节力的影响。结果表明:AIOL移动度对其调节力贡献最大,材料、中心厚度、结构对调节力基本无影响;具有非球面光学面的AIOL调节力相对较大。

**关键词:** 可调节人工晶体;屈光调节力;眼模型;光线追迹;成像质量

中图分类号:O439;R778

文献标志码:A

## Influence of different factors on diopter accommodation of accommodative intraocular lens

ZHU Hai-feng, FANG Zhi-liang, LIU Yong-ji, ZHANG Hao

(Institute of Modern Optics, Nankai University, the Key Laboratory of Opto-electronic Information Science and Technology, MOE, Tianjin 300071, China)

**Abstract:** Based on the Hwey-Lan Liou eye model and the equivalent rule, crystal lens is replaced with accommodative intraocular lens (AIOL) for imaging at infinite distance. Based on the analysis of imaging quality of human eye, the displacement, medium refractive index, central thickness, structure, aspheric refractive surface of the AIOL are studied with ZEMAX to implement light ray tracing method. Simulation results indicate that the displacement of AIOL has the greatest impact on its tunability; while it is hardly affected by the medium refractive index, central thickness, and structure. The AIOL with aspheric surface has better tunability.

**Key words:** accommodative intraocular lens (AIOL); diopter accommodation; eye model; light ray tracing; imaging quality

## 引言

尽管通过植入人工晶体来治疗白内障手术已被人们广泛认可并接受,但为了满足人们对更高质量视功能的要求,新型人工晶体的设计和发展仍然至关重要。目前囊袋内“固定型”单焦点人工晶体(single-focal intraocular lens, SIOL)被普遍认为

是最好的,并具有最合理的固定方式。但是,以单纯解决“目标视力”为目的的单焦点人工晶体植入后,在不配戴眼镜的情况下,无论是远视力还是近视力都不能提供足够的焦点深度<sup>[1]</sup>。与单焦点人工晶体相比,折射型多焦点人工晶体和衍射型多焦点人工晶体(multi-focal intraocular lens, MIOL)虽然较好

收稿日期:2006-09-19; 修回日期:2006-09-29

基金项目:超视觉人眼波像差仪研究基金资助(033183711)

作者简介:朱海丰(1977-),男,河北唐山人,南开大学现代光学所博士研究生,主要从事视觉光学方面的研究。E-mail: zhufeng\_1997@163.com

地解决了人眼在不佩戴眼镜条件下视远视近的问题,但却存在对比敏感度过低,视网膜成像质量较差,夜间视物有光晕等缺点<sup>[2]</sup>。因此,近年来一些眼科专家开始转向了对能够在囊袋内前后移动,可使人眼获得良好远近视力的人工晶体的研究。这类人工晶体称为可调节人工晶体( accommodative intraocular lens, AIOL)。AIOL的设计思路是基于相关研究中老年人的睫状肌仍保留良好生理收缩性的事实<sup>[3-4]</sup>,通过在囊袋内的前后位置变化来调节人眼焦点,达到看远看近的目的。从设计思路而言,单焦点人工晶体的前后移动,会克服一些多焦点人工晶体的缺点,产生接近类似生理意义上的调节效应。

对于AIOL的设计,除了仍要考虑对人眼成像质量的影响外,另外一个关键点就是如何提高植入AIOL人眼的屈光调节力,也就是说, AIOL的屈光调节能力越大,人眼视远视近的效果也就越好。Sugitani等人对植入硬性前房型人工晶体屈光调节力进行了测定,结果约为2D~3D; Nakazawa M等学者对植入硬性后房型人工晶体进行了测定,其屈光调节力约为2D,王海林等人的测定结果为(1.53±0.59)D。自然人眼的屈光调节力一般则能够达到5.5D以上,显然,目前人工晶体的屈光调节能力还不能够使人眼达到或接近正常的视功能。本文主要从AIOL在眼内的移动度、AIOL材料、中心厚度、结构、光学面的非球面性以及瞳孔直径等不同角度,研究各因素对AIOL的屈光调节力及调节后人眼成像质量的影响,为设计具有高调节能力的人工晶体提供一定的理论参考。

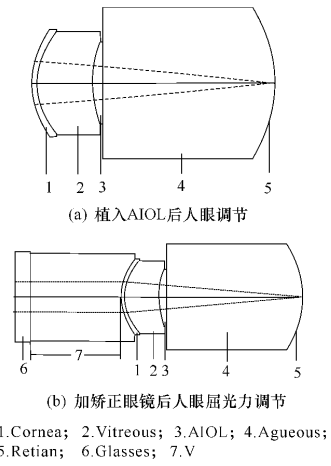
### 1 计算AIOL屈光调节力方法

以Hwey-Lan Liou<sup>[5]</sup>眼模型为基础,根据等效性原则,即保持该眼模型中自然晶状体屈光度22.135D不变,对无穷远点成像,然后将自然晶状体替换为AIOL,如图1(a)所示。当AIOL因人眼睫状肌收缩或舒张而前后移动一定距离后,为使对无穷远点仍然保持正视,可在眼前加一矫正眼镜来实现,如图1(b)所示。这样,人眼在AIOL移动后获得的屈光调节量即AIOL屈光调节力可等效为通过该眼镜度数 $D_g$ 求得的人眼屈光不正度 $De$ <sup>[6]</sup>,即

$$De = D_g / (1 + V * D_g) \tag{1}$$

式中 $V$ 为镜顶距,即眼镜与角膜前表面顶点间的距离,本文 $V$ 值取12 mm。表1为植入的AIOL在眼的内移动后眼光学系统的具体结构参数。其中:从对

人眼球差的矫正效果考虑, AIOL取凸平型<sup>[7]</sup>(未讨论AIOL结构因素);  $n$ 为植入AIOL的折射率, ACD为前房深度( anterior chamber depth, 角膜后表面中心顶点到AIOL前表面中心顶点的距离);  $R_{前AIOL}$ 与 $R_{后AIOL}$ 分别为AIOL的前后表面曲率半径;  $t$ 为AIOL在眼内的前移量;  $d$ 为AIOL中心厚度。整个计算过程均通过ZEMAX光学设计软件来实现, 视场角为 $0^\circ$ 。



1. Cornea; 2. Vitreous; 3. AIOL; 4. Aqueous; 5. Retina; 6. Glasses; 7. V

图1 植入AIOL后人眼屈光调节力示意图

Fig. 1 Schematic diagram of dioper accommodation after AIOL implantation

表1 AIOL移动后人眼结构主要参数

Fig. 1 Structural parameters of the eye after AIOL displaced

Surface	Radius/mm	Thickness/mm	Index(555 nm)
Anterior of cornea	7.77	0.5	1.376
Posterior of cornea	6.4	ACD	1.336
Anterior of AIOL	$R_{前AIOL}$	$d$	$n$
Posterior of AIOL	$R_{后AIOL}$	$23.95-0.5-ACD-d-t$	1.336

### 2 不同因素对AIOL屈光调节力的影响

目前,关于对人眼睫状肌调节使ACD变化即晶体移动量的分析,各个研究结果之间存在较大的差异,如Hardman等人利用睫状肌麻痹药物检测到麻痹后前房深度增加,测量出其最大改变值为0.25 mm, Cumming等人测量结果为0.7 mm, Rana与王海林等人测量的结果则约为0.40 mm,这可能与被测者的年龄以及植入晶体的类型等因

素有关。为此,本文选取 AIOL 在模型眼中的最大可移动量  $t$  为 1 mm,并在此基础上,分别对不同因素对 AIOL 屈光调节力的影响进行讨论。

### 2.1 AIOL 移动度影响

取 AIOL 中心厚度为 1 mm,折射率为 1.55。图 2 给出了  $t$  每增加 0.2 mm 时 AIOL 屈光调节力的大小。从图 2 可以看出, AIOL 移动度与其屈光调节力近似呈线性关系,晶体移动 1.0 mm,屈光调节力改变值约为 1.4D。

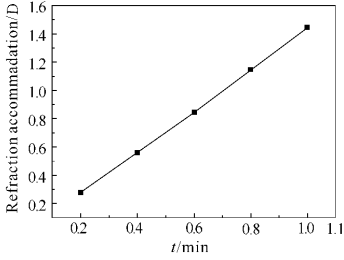


图 2 AIOL 移动距离  $t$  与其屈光调节力的关系

Fig. 2 The relationship between  $t$  and dioptric accommodation of AIOL

### 2.2 AIOL 折射率影响

常用的 AIOL 主要有以下几种材料: (1)聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA),折射率为 1.49; (2)丙烯酸酯,折射率为 1.55; (3)硅凝胶,折射率为 1.46 或 1.427。取 AIOL 中心厚度为 1 mm,分别对上述不同折射率材料的 AIOL 的屈光调节力进行计算。图 3 为不同材料 AIOL 前移 1.0 mm 时,折射率与 AIOL 屈光调节力的关系图。从图中可以看出, AIOL 折射率对屈光调节力基本没有影响。从 AIOL 移动后人眼成像质量来看,植入具有高折射率 AIOL 后人眼光学系统的 MTF 值较高,如图 4 所示。

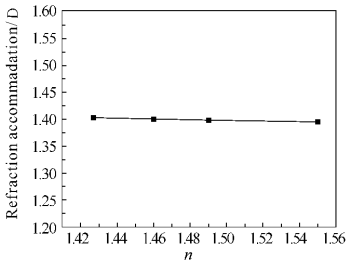


图 3  $t=1$  mm 时,  $n$  与 AIOL 屈光调节力关系图

Fig. 3 The  $n$  versus dioptric accommodation of AIOL when  $t=1$  mm

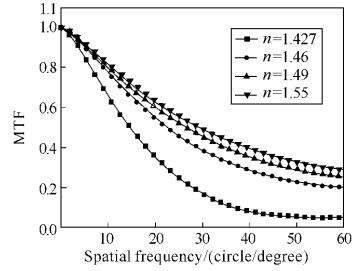


图 4  $t=1$  mm 时,植入不同材料的 AIOL 后人眼系统的 MTF  
Fig. 4 The MTF of human eye after implantation of AIOL with different  $n$  when  $t=1$  mm

### 2.3 AIOL 中心厚度的影响

当 AIOL 折射率取 1.55 时,图 5 给出了 AIOL 在眼内前移 1.0 mm 时其厚度与屈光调节力的关系图。图 5 表明, AIOL 中心厚度对屈光调节力的贡献量很小。AIOL 中心厚度对其移动前后人眼系统的 MTF 值的影响如图 6 所示。

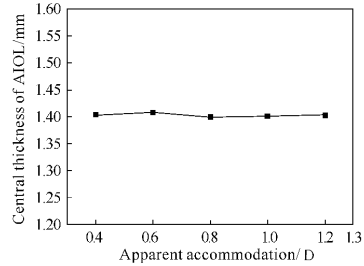


图 5  $t=1$  mm 时,  $d$  与 AIOL 屈光调节力的关系  
Fig. 5 The  $d$  versus dioptric accommodation of AIOL when  $t=1$  mm and  $n=1.55$

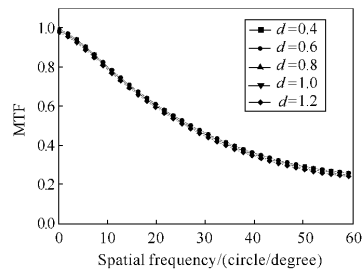


图 6  $t=1$  mm 时,植入不同  $d$  的 AIOL 后人眼系统的 MTF  
Fig. 6 The MTF of human eye after implantation of AIOL with different  $d$  when  $t=1$  mm

### 2.4 AIOL 光学结构( $R_{前AIOL}/R_{后AIOL}$ )的影响

根据等效性原则,对无穷远点正视时,我们计算出了几种与模型眼的自然晶状体屈光度相同但

光学结构 ( $R_{前AIOL}/R_{后AIOL2}$ ) 却不同的 AIOL, AIOL 中心厚度与折射率仍取为 1 mm 和 1.55。表 2 为晶体在眼内前移 1.0 mm 时的屈光调节力变化值。表

2 数据显示, 屈光调节力值没有明显变化。但不同光学结构的 AIOL 在移动后对人眼成像质量的影响非常显著, 如图 7 所示。

表 2 不同结构 AIOL 的参数及屈光调节力大小

Table 2 Parameters and diopter accommodation of AIOL with different structures

$R_{前AIOL}/R_{后AIOL2}$	convex-plane	plane-convex	equal biconvex	biconvex	convex-concave
$R_{前AIOL}/mm$	6.957	$\infty$	13.863	7.375	5.453
$R_{后AIOL}/mm$	$\infty$	-6.957	-13.863	-121.06	24.746
ACD/mm	5.5516	5.0152	5.382	5.5	5.832
DA/D	1.397	1.395	1.401	1.402	1.398

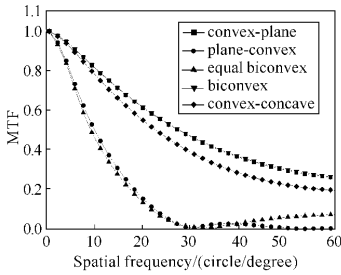


图 7  $t=1$  mm 时, 植入不同结构 AIOL 后人眼系统的 MTF

Fig. 7 The MTF of human eye after implantation of AIOL with different structure when  $t=1$  mm

### 2.5 AIOL 非球面(球差)的影响

引入人工晶体非球面光学折射面可以矫正人眼系统的球差, 从而提高人眼成像质量<sup>[8-9]</sup>。图 8 为中心厚度是 1 mm, 折射率为 1.55 的凸平型非球面 AIOL 与球面 AIOL 移动 1 mm 后, 人眼光学系统的 MTF 曲线图。图 8 显示, Zernike 标准多项式<sup>[10]</sup>系数中代表初级球差项的  $Z_{11}$  由 0.110 078(植入

非球面 AIOL 前表面的二次非球面系数利用 ZEMAX 聚焦软件自动优化给出。图 9 为非球面 AIOL 与球面 AIOL 在模型眼内每移动 0.2 mm 时的屈光调节力。从图 9 可以看出, 非球面 AIOL 的调节能力要大于球面 AIOL, 当晶体移动 1 mm 时, 屈光调节力大小的差值约为 0.1 D。

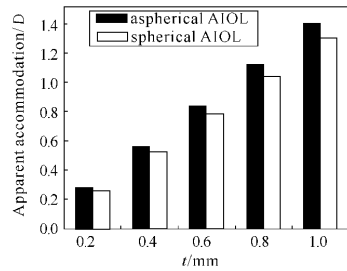


图 9 球面 AIOL 与非球面 AIOL 移动距离  $t$  与其屈光调节力的关系

Fig. 9 The  $t$  versus diopter accommodation of spherical and aspherical AIOLs

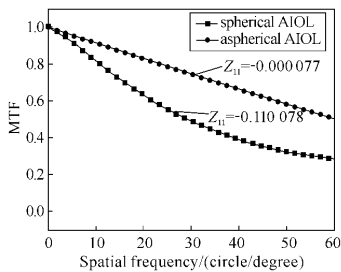


图 8  $t=1$  mm 时, 球面 AIOL 与非球面 AIOL 在人眼系统的 MTF

Fig. 8 The MTF of human eyes with spherical and aspherical AIOLs when  $t=1$  mm

球面 AIOL) 减小到 -0.000 077(植入非球面 AIOL), 非球面的 AIOL 明显改善了人眼的成像质量。其中

### 3 讨论

本文采用的眼模型是根据最新的生理解剖学数据建立起来的。该模型不仅考虑了角膜和晶状体的非球面性, 也考虑了晶状体折射率的梯度变化, 是到目前为止最为接近眼睛解剖结构的人眼模型, 并且在建立眼模型中最难确定的晶状体参数(厚度、曲率、层数)<sup>[11]</sup>在本模拟实验中并不需要考虑。采用 ZEMAX 光学设计软件实现从角膜到视网膜的光线追迹, 其原理符合 Snell 定律。同时在追迹计算中不存在近似, 计算准确性不受实际给出参数限制, 如果给定准确的人眼各项生理解剖结构参数, 那么其计算误差可以忽略不计。

Makoto 等人<sup>[12]</sup>对角膜多焦性与 AIOL 屈光调节力间的关系进行了研究, 并指出二者呈正相关的

关系,即在瞳孔区角膜屈光力变化范围越大,屈光调节力越大。Nawa 等人<sup>[13]</sup>研究结果指出,假定角膜曲率半径为 7.7 mm 时,随着眼轴的增长(21~27 mm),相应植入 AIOL 的度数也减小(30D~11D),AIOL 每向前移动 1.0 mm 屈光调节力,其度数相应从 2.3 D 下降至 0.8 D;若眼轴固定在 24 mm 时,随着角膜曲率半径的增大(6.5~9.5 mm),相应植入 AIOL 的度数增加(10D~30D);AIOL 每向前移动 1.0 mm 屈光调节力,其度数从 0.5 D 升高至 1.9 D,可见 AIOL 的屈光调节力大小还与眼轴长度和角膜曲率及植入晶体屈光度大小有着明显的关系。在个体人眼的角膜参数和眼轴长度已固定的条件下,提高 AIOL 的屈光调节力主要以 AIOL 的设计和研发为出发点。在 AIOL 移动度、材料、中心厚度、结构和光学面的非球面性等因素中,晶体的材料和结构对 AIOL 屈光调节力基本没有影响,其设计理念应遵从传统的单焦点人工晶体设计,选取高折射率介质材料和适合的光学结构来提高人眼的成像质量。

AIOL 非球面的光学面不仅能降低人眼系统的球差,提高人眼成像质量,而且也使 AIOL 屈光调节力增大。在本文选取的眼模型中,通过利用 ZEMAX 聚焦软件对 AIOL 光学面二次非球面系数自动优化,球差基本已被矫正。试验结果显示,AIOL 在眼内每前移 1 mm,屈光调节力提高 0.1D。

AIOL 在眼内的移动度对 AIOL 屈光调节力贡献最大,在人眼睫状肌舒张收缩能力一定的前提下,有效增大 AIOL 的前移距离是 AIOL 设计的关键。例如,增大人工晶体的襻与囊袋的接触面积,可充分利用睫状肌调节时囊袋所产生的力量来增加 AIOL 前移的距离;还有对 AIOL 襻与光学部之间连接点进行设计,可利用该连接点的机械传递来增大 AIOL 的前移,目前已经有该类型 AIOL 的相关报导<sup>[14]</sup>。

由于 AIOL 的中心厚度对其屈光调节力和人眼像质的影响都不明显,因此,对于 AIOL 中心厚度的设计应以薄型,但在光襻调节过程中不会发生明显变形为好,因为薄晶体质量更轻,更容易接受晶体光襻传递的力,从而增大晶体的移动距离。

此外,有研究显示,人工晶体植入手术前预留 -0.5~-1.0 D 的屈光度可增大 AIOL 的屈光调节力。该方式虽在一定程度上避免了佩戴眼镜的不便,但是却明显降低了视觉质量,同时也失去了白内障手术作为屈光手术的一些特点,因此本文未对

此作相关研究。

## 4 结论

在 Hwey-Lan Liou 眼模型基础上,利用 ZEMAX 实现光线追迹的方法,分析可调节人工晶体在眼内的移动度、材料、中心厚度、结构、光学面非球面性、瞳孔直径等因素对 AIOL 屈光调节力及人眼成像质量的影响。结果表明:AIOL 移动度对其屈光调节力贡献最大;材料、厚度、结构对屈光调节力影响很小;具有非球面光学面的 AIOL 屈光调节力相对较大;结合对人眼成像质量的影响,高屈光调节力的 AIOL 应具有移动距离大,高折射率,厚度薄,非球面光学面和适当的光学结构等特点。

### 参考文献:

- [1] 温新富,柳林. ARRAY 新型多焦点与单焦点人工晶体的疗效比较[J]. 国际眼科杂志, 2004,4(1):128-131.  
WEN Xin-fu, LIU Lin. Comparative effects of multifocal versus monofocal intraocular lens[J]. Int J Ophthalmol, 2004,4(1):128-131. (in Chinese)
- [2] RANDALL O J, LILIANA W, NICK M, et al. New intraocular lens technology [J]. Am J Ophthalmol, 2005,140(4):709-716.
- [3] STRENK S A, SEMMLOW J L, STRENK L M. Age-related changes in human ciliary muscle and lens: a magnetic resonance imaging study[J]. Invest Ophthalmol Vis Sci, 1999,40(6):1162-1169.
- [4] GLASSER A, KAUFMAN P L. The mechanism of accommodation in primates [J]. Ophthalmology, 1999,106(5):863-872.
- [5] LIOU H L, BRENNAN N A. Anatomically accurate, finite model eye for optical modeling[J]. J Opt Soc Am A, 1997,14(8):1684-1695.
- [6] 江海河,余吟山,陆志贤,等. 近视眼激光角膜切除术原理及控制方法[J]. 激光生物学报,1998,7(4):249-253.  
JIANG Hai-he, YU Yin-shan, LU Zhi-xian, et al. The principle and controlling method of excimer laser photorefractive keratectomy [J]. Acta Laser Biology Sinica, 1998,7(4):249-253. (in Chinese)
- [7] UCHIO E, OHNO S, KUSAKAWA T. Spherical aberration and glare disability with intraocular lenses of different optical design [J]. J Cataract Refract Surg, 1995, 21(6):690-696.
- [8] GRIFFITH E A, LOUIS D N, STEPHEN S L, et al. Optical performance of 3 intraocular lens designs in

the presence of decetration [J]. J Cataract Refract Surg, 2005, 31(3): 574-585.

[9] 沈为民,薛鸣球.非球面眼镜片的像差分析和设计[J].光学学报,2002,22(6):743-748.

SHEN Wei-min, XUE Ming-qiu. Aberration analysis and optical design of aspheric spectacle lens [J]. Acta Optica Sinica, 2002, 22(6): 743-748. (in Chinese)

[10] 王扬,王肇圻,郭欢庆,等.人眼的高级像差对视功能的影响[J].光学学报,2005,25(11):1519-1525.

WANG Yang, WANG Zhao-qi, GUO Huan-qing, et al. Impact of higher-order wavefront aberrations of human eyes on vision performance [J]. Acta Optica Sinica, 2005, 25(11): 1519-1525. (in Chinese)

[11] 刘永基,方志良,王肇圻.具有层状晶状体的人眼模型的光学性质[J].光学学报,2005,25(1):136-140.

LIU Yong-ji, FANG Zhi-liang, WANG Zhao-qi. A study on eye's optical characters with anatomically accurate shell-lens[J]. Acta Optica Sinica, 2005, 25(1): 136-140(in Chinese)

[12] MAKOTO F, TETSURO O, SHIRO A, et al. Relationship between apparent accommodation and corneal multifocality in pseudophakic eyes [J]. Ophthalmology, 1999, 106(6): 1178-1181.

[13] NAWA Y, UEDA T, NAKATSUKA M, et al. Accommodation obtained per 1.0 mm forward movement of a posterior chamber intraocular lens[J]. J Cataract Refract Surg, 2003, 29(11): 2069-2072.

[14] KUCHLE M, NGUYEN N X, LANGENBUCHER A. Stability of refraction, accommodation, and lens position after implantation of the ICU accommodating posterior chamber intraocular lens [J]. J Cataract Refract Surg, 2003, 29(12): 2324-2329.

## 美国陆军新型装甲侦察直升机选定头盔-追踪系统

EFW 公司将为美国陆军的新型装甲侦察直升机提供头盔显示和追踪系统(Helmet Display and Tracking System, HDTS)。HDTS 将会在 EFW 公司的飞行员夜视成像系统/头盔显示 ANVIS/ HUD (Aviator's Night Vision Imaging System/Head Up Display)基础上集成可为飞行员瞄准和提示的追踪系统。项目到 2012 年总价值 5 100 万美元。

HDTS 可为飞行员提供增强的态势感知能力,并增强飞行的安全性。通过将关键的飞行信息发送到昼夜显示镜的观测仪上实现昼夜工作。系统还可使飞行员能够相互提供瞄准线指示,或显示光电载荷的瞄准线。

从 20 世纪 90 年代中期开始,EFW ANVIS/ HUD 系统就已用于美国陆军、海军和空军,被安装在多种特种作战直升机平台上,如 H-60, CH-53 CH-47, CH-46, H-1, V-22 等。额外的追踪和瞄准线功能使头盔安装系统为美国军队飞行员提供卓越的态势感知和机组人员交互能力。

EFW 还提供头盔和显示器集成瞄准系统(Integrated Helmet and Display Sighting System, IHADSS),可为美国陆军“阿帕奇”攻击直升机飞行员提供头盔安装夜视、飞行数据和武器瞄准信息。此外,EFW 还为美国和其他联盟国家提供用于固定翼作战飞机的联合头盔提示系统(Joint Helmet Mounted Cueing System, JHMCS)和用于美国联合攻击战斗机的头盔系统。

(昌 强)