

doi: 10.7690/bgzd.2016.07.014

虚像显示系统自由曲面光学设计

邓晴莺^{1,2}, 马斌³, 李国翬¹, 王宝奇², 姚建铨¹

(1. 天津开发区奥金高新技术有限公司天津大学, 天津 300072;

2. 北京摩诃创新科技股份有限公司, 北京 100000; 3. 北京航空荣康科技发展有限公司, 北京 100000)

摘要: 为解决模拟器虚像显示系统由于离轴显示限制视场、眼点前移大幅降低边缘像质的问题, 设计一种新型离轴虚像显示系统。利用像差理论, 采用光线追迹方法, 在全视场立体空间反向追迹光线, 应用弥散斑均方根半径和平行度误差对 R2450-500-60°视景系统进行像质评价。结果表明: 该设计能够改善像质, 减小双目不平行度, 使边缘视场角与像质达到要求。该设计系统不仅能大幅改善其光学性能, 将垂直现场扩大到 60°, 而且实现成本较低, 能进行大尺寸、大视场应用, 满足多任务飞行模拟器的需求。

关键词: 飞行模拟器; 虚像; 自由曲面

中图分类号: T391.9 **文献标志码:** A

Design for Abnormity Free Form Screen of Virtual Image Display System

Deng Qingying^{1,2}, Ma Bin³, Li Guohui¹, Wang Baoqi², Yao Jianquan¹

(1. TEDA OrKing Hi-Tech Co. Ltd Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Beijing Moreget Creative Technology Co. Ltd, Beijing 100000, China;

3. Beijing Rocky Aerospace Technology Co. Ltd, Beijing 100000, China)

Abstract: Because of off-axial display, field of view in collimated display system of flight simulators is restricted and forward movement of eye point reduces edge imaging quality greatly, design a new off-axial virtual image display system. Use aberration theory, adopt light tracking method, reversely track light in full vision field stereo space, and use defocused spots mean square root radius and parallel degree error to carry out image quality evaluation for R2450-500-60° visual system. The results show that the design can improve image quality, reduce binocular non-parallelism, and make the edge field angle and image quality meet the requirements. The design system can improve its optical properties, and extend vertical field of view to 60°. It fulfills the large field of view requests of multi-mission flight simulators with low cost.

Keywords: fight simulator; virtual image display system; free form screen

0 引言

模拟器视景显示主要有虚像显示和实像显示 2 种方式。虚像显示分为同轴分光镜准直和离轴准直显示方式, 离轴虚像显示系统又称广角无限显示设备(wide-angle infinity display equipment, WIDE)。与实像显示方式相比, 虚像显示方式具有景深感强、成像逼真度高等特点, 被大型高档飞行模拟器广泛采用。由于系统离轴显示, 视场受到限制, 垂直瞬时视场一般最大只能达到 50°, 该系统的物与所产生的像偏离光轴角度较大, 因而光学系统不完全满足近轴光学的公式和规律, 将离轴光线投影到轴上进行计算后仍有误差存在。目前系统中校正像差主要是采用高次非球面反射镜^[1], 但是其制造难度大、成本高, 垂直视场受到限制; 旋转成型的背投影屏, 在水平视场较大时, 因眼点偏离旋转轴, 视场中心图像和边缘差异较大^[2]; 使用软件校正不能从本质

上校正像差, 只能对畸变校正与颜色、亮度融合提供帮助^[3]。因此, 笔者设计了一种新型离轴虚像显示系统, 垂直视场达到 60°, 水平视场大于 200°, 成像质量优良, 满足使用要求。

1 系统的基本原理

虚像显示系统主要由投影器、球面准直镜及背投影屏幕组成, 系统如图 1 所示。准直反射镜一般为硅玻璃材质球面反射镜或高反平膜负压成形球面反射镜。背投影屏幕一般是双曲面硬幕, 通常是平板有机玻璃在模具上热压成形, 再经特殊的涂层工艺处理得到, 要求其透射率高、散射效果好^[4]。

在模拟飞行时, 为增加成像的景深感和逼真度, 往往将观察者所看到的像看作来自无穷远处。人观察与判断远处或接近无限远处物体的距离和相互位置关系时, 会根据经验判断物体大小和遮挡关系的变化, 而不仅是依赖于两眼视角差效应。图像发生

收稿日期: 2016-03-03; 修回日期: 2016-04-18

基金项目: 一体化太阳能预警侦察无人机关键技术综合试验平台(2014AA7052002)

作者简介: 邓晴莺(1980—), 女, 湖南人, 博士, 副总工, 从事计算机系统结构、飞行模拟器设计研究。

器产生的视景图像的物体大小和相互关系只要符合观察点的视线关系，就可把人的视觉感觉还原为与空中飞行完全相同的视觉感觉和纵深感，产生与真实飞行一致的加速、俯仰、转弯、滚转和侧滑等感觉，使飞行员及时做出相应的判断和飞行动作。

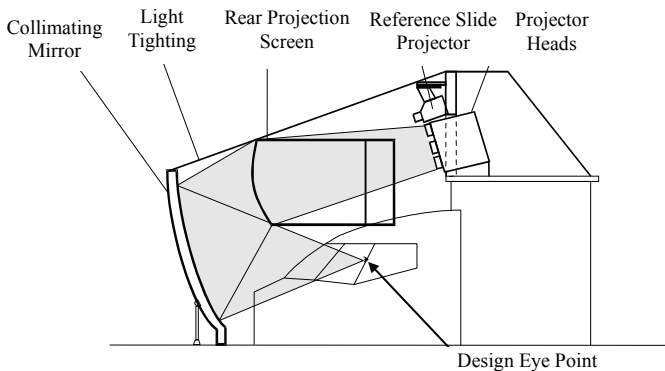


图 1 虚像显示系统结构

根据应用光学，对于正屈光度的光学系统，当物体位于焦点以内时，所成像将位于物体的同一侧，形成一正立的位于焦点以外的放大虚像，物体越接近于焦点，像距越大。当物体位于系统的焦点处时，理论上，其像将成在无穷远处。它的效果是使观察者确实看到了位于远处的物体，达到再现真实世界的目的，其物像关系式可由高斯公式表示。

$$l/f + l'/f' = 1 \quad (1)$$

式中： f 为物方焦距； f' 为像方焦距； l 为物距； l' 为像距。

2 系统设计

整个系统的设计分为 2 步：1) “初步设计”，即根据系统的技术要求(结构尺寸、视场角、加工工艺等)，确定球面反射镜的半径，进行全视场光线追迹后按照几何光学的基本定律进行光路计算，确定背投影屏初始面型。2) “像差设计”，在一定视角下的整个入瞳面上选若干点，从每一个物点出发进行光线追迹，根据这些光线的像差大小确定整个系统的成像质量，如果成像质量不满足视觉要求，则反复修改投影屏的位置和面形及眼点位置，重新计算系统像差，使系统获得最优化成像质量，即成像距离足够远、视场角大、像差和畸变最小，并且满足加工设备和工艺的可行性。

2.1 初步设计

适合多任务模拟器的原始系统设计参数：球面反射镜为 $R 2\ 450\ \text{mm}$ ；眼点离轴为 $483\ \text{mm}$ ；视场为水平 220° 、垂直 60° ；眼点离上投影屏为 $280\ \text{mm}$ ；球形背投影屏半径为 $1\ 120\ \text{mm}$ 。其设计原理见图 2。

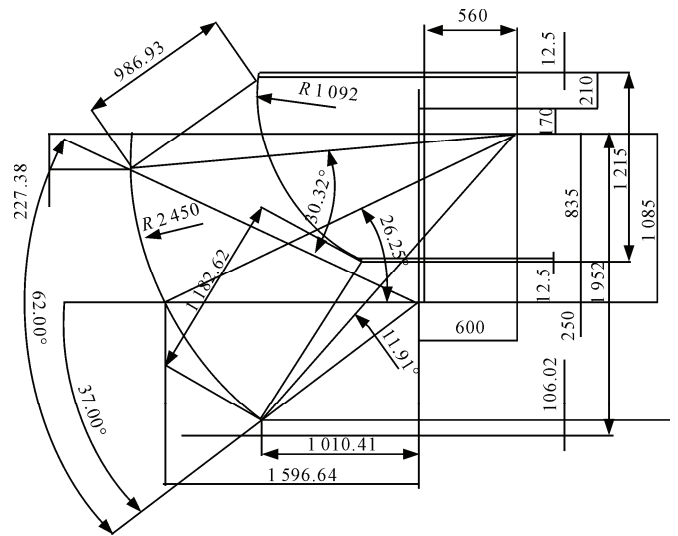


图 2 设计系统的原理

离轴虚像系统的像在无穷远近似为平行光，所以系统光路可以进行反向追迹，等价于入瞳在眼点处的瞳孔，以不同视角入射平行光，像面即为背投影屏面型。最佳像面位置就是背投影屏的最小像差最佳设计。

应用矢量法进行空间光线的准确追迹，首先建立右手坐标系。光线从眼点以视角 (θ, φ) 出射，自物空间追迹这条实际光线，穿过入瞳，方向矢量为 $\mathbf{P}(LMN)$ 。联立出射光线方程与反射镜球面方程，求出交点 A 。

入射光线用单位向量 \mathbf{P} 表示，法线方向 \mathbf{N} 为反射镜圆心与交点 A 连线方向的单位矢量，折射光线方向用单位向量 \mathbf{Q} 表示。则折射定律的向量形式为：

$$n\mathbf{P} \cdot \mathbf{N} = n'\mathbf{Q} \cdot \mathbf{N} \quad (2)$$

反射为 $n' = -1$ 的特殊折射形式，通过已知各量即可求出反射向量 \mathbf{Q} 。以反射方向矢量 $\mathbf{Q}(L' M' N')$ 作为初始像面的法线方向，以从瞳孔中心入射的光线作为主光线。应用高斯公式 (1)，对所追迹的光线计算相应的物像距离。因为入射为平行光，所以 $l' = f$ ，这样就可确定在视角 (θ, φ) 时的像点位置。

对各个视场(水平 220° ，垂直 $60^\circ(-35^\circ \sim 25^\circ)$)都进行追迹后就得到像面的初始位置，即后投影屏的三维初始面型。

2.2 背投影屏的面形优化

在确定像距时使用了小角度下近似的高斯公式，得到的初始面型只是理想设计，并不是最佳面型。这就需要应用像差理论进行优化，求出最佳像面位置，即最佳背投影屏的面形^[5]。

首先要选取一个评价函数来表示系统成像质量的好坏，并以此为标准进行优化。它必须能够全面反映成像质量，正确反映结构参量改变对像质的影响。从几何光学的意义上说，垂轴像差平方和描述的是像点的弥散斑大小，Berlyn Brixner 通过计算发现，波像差的均方根与垂轴像差的均方根成线性关系；因此，在一定程度上可以认为它们等价^[6]。用垂轴像差平方和作为评价函数计算量小，最佳像面很容易求得，是具有代表性的评价函数。

根据入瞳平面划分的网格，按规定的视场分点计算穿过各网格的光线坐标，进行光线追迹，得到参与成像光线各自的垂轴像差，以其作为优化函数，用 F_1, \dots, F_m 表示；系统背投影屏幕的面形与位置作为自变量，用 x_1, \dots, x_n 表示。二者之间有函数关系。

$$\begin{bmatrix} F_1 \\ \vdots \\ F_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1(x_1, \dots, x_n) \\ \vdots \\ f_m(x_m, \dots, x_n) \end{bmatrix} \quad (3)$$

对于这种复杂非线性方程组，只有通过数值求解。首先利用幂级数展开方程，只选取幂级数一次项，近似的用线性方程来代替：

$$F = F_0 + \frac{\partial f}{\partial x_1}(x_1 - x_{01}) + \dots + \frac{\partial f}{\partial x_n}(x_n - x_{0n}) \quad (4)$$

式中： F_0 为初始设计下的垂轴像差； x_{01}, \dots, x_{0n} 为初始面形参数值； F 为优化后像差测量值；

$\frac{\partial f}{\partial x_1}, \dots, \frac{\partial f}{\partial x_n}$ 为像差对各个自变量参数的一阶偏导数。用差商 $\frac{\delta f}{\delta x}$ 代替导数 $\frac{\partial f}{\partial x}$ 可以得到像差与自变量之间的近似线性方程组。

若采用以下矩阵替换：

$$\Delta \mathbf{x} = \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \vdots \\ \Delta x_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 - x_{01} \\ \vdots \\ x_n - x_{0n} \end{bmatrix}; \quad (5)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \frac{\delta f_1}{\delta x_1} & \dots & \frac{\delta f_1}{\delta x_n} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\delta f_m}{\delta x_1} & \dots & \frac{\delta f_m}{\delta x_n} \end{bmatrix}; \quad (6)$$

$$\Delta \mathbf{F} = \begin{bmatrix} \Delta F_1 \\ \vdots \\ \Delta F_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1 - F_{01} \\ \vdots \\ F_m - F_{0m} \end{bmatrix}; \quad (7)$$

$$\mathbf{A} \Delta \mathbf{x} = \Delta \mathbf{F} \quad (8)$$

式中： $\Delta \mathbf{x} = \mathbf{x} - \mathbf{x}_0$ 为面型参数优化后的偏差矩阵； $\Delta \mathbf{F} = \mathbf{F} - \mathbf{F}_0$ 为垂轴像差实际测量值与初始设计值之差，是系统的光学质量随后投影屏面形优化而变化的值。

将实际像差与计算像差的差值称为“像差残量”，即：

$$\phi = \mathbf{A} \Delta \mathbf{x} - \Delta \mathbf{F} \quad (9)$$

取各像差残量的平方和构成另一个函数：

$$\Phi(\Delta \mathbf{x}) = \phi^T \phi = \sum_{i=1}^m \phi_i^2 \quad (10)$$

$\Phi(\Delta \mathbf{x})$ 称为“评价函数”，因为参与评价的垂轴像差数目大于面形参数，为超定方程组，只能求出最小二乘解。

$$\min \Phi(\Delta \mathbf{x}) = \min \sum_{i=1}^m \phi_i^2 = \min [(\mathbf{A} \Delta \mathbf{x} - \Delta \mathbf{F})^T (\mathbf{A} \Delta \mathbf{x} - \Delta \mathbf{F})] \quad (11)$$

根据多元函数的极值理论， $\Phi(\Delta \mathbf{x})$ 取得极小值解的必要条件是一价偏导数等于零。

$$\nabla \Phi(\Delta \mathbf{x}) = 0 \quad (12)$$

只要方阵 $\mathbf{A}^T \mathbf{A}$ 为非奇异矩阵，解的公式为：

$$\Delta \mathbf{x} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \Delta \mathbf{F} \quad (13)$$

对初始结构中追迹的每条光线沿反射方向 $\mathbf{Q}(L' M' N')$ 在原像点基础上位移 $\Delta \mathbf{x}_m$ ，可得到最佳像面位置，最佳像面就是异型背投影屏幕的优化设计，背投影屏幕的面形近似为椭球，系统俯视图如图 3。

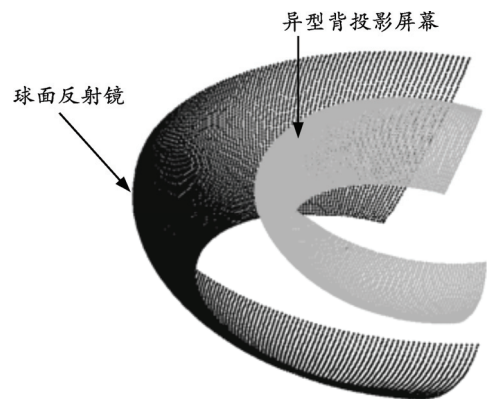


图 3 系统俯视图

优化后系统参数：

球面反射镜为 $R \ 2 \ 450 \text{ mm}$ ；眼点离轴为 500 mm ；视场为水平 220° 、垂直 $60^\circ (-35^\circ \sim 25^\circ)$ ；眼点离上投影屏为 245 mm 。

优化后眼点前移 17 mm ，异型背投影屏向下移动 35 mm ，垂直中心视场达到 60° ，瞬时视场在反

射镜边缘处(水平 110°时)为 33.5°(-24°~9.5°), 总视场在反射镜边缘处为 43°(-24°~19°), 符合训练要求。

3 像质分析

首先应用弥散斑半径 (root mean square for spot radius, RMS) 对系统进行评价。它是对一定视角下入瞳面内真正参与成像的 n 条光线弥散量取均方根值, 是对分视场垂轴像差整体的一种度量, 计算时设入瞳直径即瞳孔直径为 4 mm。定义系统在 i 视场的弥散半径为

$$\rho = \left[\sum_{j=1}^n (\delta Y_{ij}^2 + \delta Z_{ij}^2) / n \right]^{1/2} \quad (14)$$

应用球形背投影屏设计的 R2450-483-60°视景系统弥散斑半径如表 1。

表 1 原始系统弥散斑均方根半径 μm

视场	RMS	视场	RMS	视场	RMS
0°, 25°	2 022.98	眼点	2 370.97	0°, -35°	2 610.83
80°, 18°	1 658.62	80°, -25°	1 717.12	110°, 0°	1 705.57

初步设计异型背投影屏后 R2450-500-60°视景系统的弥散斑半径如表 2。

表 2 初始结构弥散斑均方根半径 μm

视场	RMS	视场	RMS	视场	RMS
0°, 25°	235.17	眼点	196.34	0°, -35°	39.364
80°, 18°	214.34	80°, -25°	178.59	110°, 0°	230.52

优化后异型背投影屏 R2450-500-60°视景系统的弥散斑半径如表 3。

表 3 自动优化后弥散斑均方根半径 μm

视场	RMS	视场	RMS	视场	RMS
0°, 25°	155.29	眼点	126.14	0°, -35°	29.87
80°, 18°	93.451	80°, -25°	69.43	110°, 0°	97.08

经对比发现, 系统的初始设计大幅改善了像质: 经过优化后, 系统边沿像差进一步降低, 解决了水平视角受限制的问题^[7]。

国家标准要求飞型模拟器虚像显示系统平行度误差小于 0.10 屈光度 (diopters), 即 $SD=0.10$, 所以 $l=10\text{ m}$ 。人的双眼接收背投影屏上某物点发出的宽度为 65 mm (人的双目距离) 的光束的夹角为 22.3'。

$$\theta = d / l = 65 / 10\ 000 \times 180 / \pi = 0.372^\circ = 22.3' \quad (15)$$

平行度误差, 即双目不平行度的好坏决定了最终显示像的远近、立体深度感的强弱, 是评定无限远显示系统性能优劣的一项重要指标, 各方案准直精度如表 4。

表 4 各方案双目不平行度

方案	不平行度	方案	不平行度
球形后投影屏初步设计	107.47'~170.67'	优化后	9.65'~19.27'

优化后双目不平行度小于 20', 符合高档模拟器的要求。通过对比发现, 平行度误差与弥散斑均方根半径成正比, 当弥散斑均方根半径小于 160 μm 时, 平行度误差符合要求, 也就是说平行度精度取决于整个系统的像差, 离轴角越小, 准直精度越好。

4 系统技术实现

制造后投影屏的关键是寻找光透过率高、清晰度高材料和漫透性好的涂层以及可行的成形工艺和刚度高、质量轻、热稳定性高的支撑结构。

后投影屏由浇注的增塑丙烯酸酯塑料板 YB-2 有机玻璃制成。有机玻璃是一种高分子材料, 其基本成份是甲基丙烯酸甲酯的聚合物, 是典型的线形无定形热塑性塑料, 它在不同温度下呈现 3 种物理状态: 玻璃态、高弹态和粘流态。浇注有机玻璃的变形-温度关系曲线见图 4, 图中曲线在 a 点以下为玻璃态, 其相应温度 T_g 称为玻璃转变温度 (亦称玻璃化温度), T_g 以上有机玻璃开始变软, 形变增加, 材料呈橡胶态, 具有高弹性。温度升高至 b 点以上, 有机玻璃开始粘性流动, 材料出现不可逆的塑料性形变, b 点的相应温度 T_f 称为粘流温度。YB-2 有机玻璃 $T_g=90\text{ }^\circ\text{C}$, $T_f=150\text{ }^\circ\text{C}$ 。有机玻璃在 T_g 以下为刚性固体, 具有结构强度, 呈弹性变形特征, 是有机玻璃的可使用状态。 T_g 以上稍加外力, 材料则产生大的可逆变形, 呈高弹性变形特殊性征, 有机玻璃可在高弹态下成形。温度超过 T_f , 在外力作用下, 材料会产生不可逆变形。

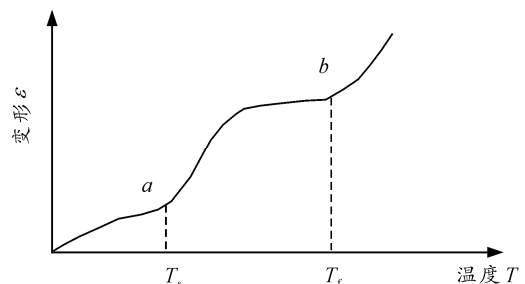


图 4 有机玻璃变形-温度关系曲线

后投影屏是尺寸要求精确、光学质量好的大型 (6 000 mm×2 000 mm) 双曲面零件, 在高弹状态下用阴模真空负压成形较好。该方法是将有机玻璃坯于阴模中, 加热接近 T_g 状态, 利用真空造成压力差, 使坯拉伸贴模成形, 见图 5。成形的真空度应保证坯完全贴模, 同时又不产生印痕。

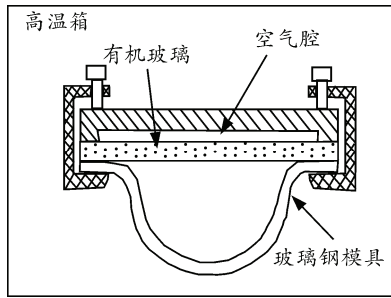


图 5 后投影屏加工

5 结论

笔者探讨了离轴虚像显示系统自由曲面背投影屏幕的设计与优化算法，通过对光路进行空间全视场光线追迹并应用像差理论进行优化得到了背投影屏幕的最佳面型，用弥散斑均方根半径和平行度误差对 R2450-500-60°视景系统进行了像质评价。结果表明：该设计能够减小双目不平行度，改善像质，使边缘视场角与像质达到要求。异型背投影屏实现成本较低，能够进行大尺寸、大视场应用，已被新式高性能飞行模拟器视景显示系统方案采用，取得了很好的应用效果。

(上接第 49 页)

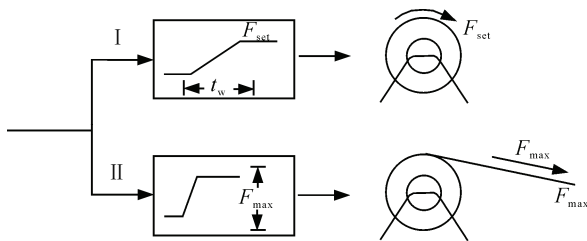


图 4 拖挂应急处理

拖缆张力也依照收放作业和拖曳作业阶段分 2 种情况，实际工作中就最大张力而言收放可达拖曳时的 2 倍，拖挂应急处置程序主要用于拖曳作业。情况 1：拖曳作业时，如拖挂的是渔业网具，拖缆张力 F 表现为持续增大，而非瞬间增大，短时间内不足以达到拖动绞车被动放缆要求^[6]。如图 4，设计时设置张力门限 F_{set} 和时间窗 t_w ，2 个条件同时满足后转入拖挂应急处置程序，此时置绞车于背压状态，以设定速度 v_{set} 进行放缆操作，并把拖挂报警向上级控制系统报告以进行降速停船等处置。情况 2：若拖挂对象质量较大而难于被拖动或与障碍物碰撞，拖缆张力会短时间明显增大而超过门限 F_{max} ，判定时间窗将被忽略直接进入应急处置程序，此时

参考文献：

- [1] Li Y, Yang H B, Zhang X. Research of Scene Optical Display System for Large-scale transport Flight Simulator[J]. Journal of System Simulation, 2007, 19(11): 2449-2660.
- [2] Lu Y, Fan X D, Wang Y L. Design and Study of Project Screen about Wide-angle Infinity Visual Scene Display System[J]. Optical Technique, 2003, 29(2): 158-160.
- [3] Spagno C P, Kunz A M. Construction of a Three-sided Immersive Telecollaboration System[C]//in Proc. 2003 IEEE Virtual Reality Conf., Los Angeles: IEEE, 2003: 37-44.
- [4] Ma Q Y, Xi G X. Technologies and Applications of Wide-Angle Infinity Display Equipment System for Collimated-image Displays of Flight Simulator[J]. Journal of System Simulation, 2002, 14(3): 319-321.
- [5] Li L, L. An S. Theory and Application of Computer Aided Optical Design[M]. Beijing: National Defence Industry, 2002: 90-112.
- [6] Booth M J. A Model-based Approach to Wave Front Sensorless Adaptive Optics[C]//in Proc. MEMS Adaptive Optics Conf., San Jose: SPIE, 2007: J-1-J-8.
- [7] Kintz G J. Properties and Applications of Spherical Panoramic Virtual Displays[C]//in Proc. 6th Annu. Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems Conf., San Jose: SPIE, 1999: 428-435.

需立即松开液压马达刹车，绞车置于背压，绞车会因拖缆张力过大，而以系统设计最大速度 v_{max} 被拖动而放缆，快速反应，尽可能降低拖挂造成的伤害。

4 结束语

海上环境复杂，拖曳系统所要面对的问题颇多；因此，笔者在系统设计时尽量分析可能遇到的问题，并设计出相应的解决办法以提高应对能力。随着海上拖曳系统应用发展，继续对提高系统安全性和风险应对能力的探索和研究将是有重要价值的工作。

参考文献：

- [1] 何志强. 拖曳式水下运载器收放系统技术研究[J]. 声学与电子工程, 2009(1): 47-48.
- [2] 王飞, 黄国樑, 邓德衡. 水下拖曳系统的稳态运动分析与设计[J]. 上海交通大学学报, 2008(4): 679.
- [3] 冯甦. 声纳水下拖曳系统运动姿态研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2005: 17.
- [4] 王海波, 王庆丰. 一种新型拖体收放电液比例系统及其同步控制策略研究[J]. 兵工学报, 2008, 29(12): 1527.
- [5] 何付同, 冷宏祥, 张剑锋, 等. 一种汽车用液压电磁阀控制电路设计[J]. 工业控制计算机, 2014, 27(8): 145.
- [6] 陈玉龙, 雷宇, 张亮. 拖曳水池拖车结构方案设计[J]. 机电工程, 2015, 32(12): 1586.