

有人驾驶飞机侧杆操纵装置人机工效精细化设计



师振云,张军红,江飞鸿

航空工业第一飞机设计研究院, 陕西 西安 710089

摘要: 人机工效直接决定了侧杆操纵装置的工作特性,与飞行安全和飞行品质紧密相关。本文通过构建飞行员操纵动作模型和总结工程经验,系统地描述了基于人机工效的侧杆精细化设计技术,包括握点范围、纵/横向操纵解耦实现、中立位置安装角度确认、杆力—杆位移特性设计、操纵阻尼、中立位置锁定及附属开关布置等。在充分考虑人机工效影响及约束的条件下,给出了侧杆主要技术参数的设计参考范围。通过研究侧杆动态性能,提出了操纵性能评价准则,阐述了飞行品质规范对侧杆操纵特性的要求,表明了侧杆人机工效的特殊性。本文的研究成果对侧杆设计研发具有一定的参考价值。

关键词: 侧杆; 人机工效; 精细化设计; 操纵特性; 最优评价准则

中图分类号: V249.11

文献标识码: A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2025.07.014

侧杆操纵装置简称侧杆,是在中央杆基础上改进的一种飞行员手操纵装置^[1],通常安装在驾驶舱侧操纵台上,有效地解决了传统中央杆(盘)挤占飞行员前方空间、遮挡视野的问题,同时大幅减轻了控制装置的重量^[2-3]。侧杆包括手柄和集成组件,集成组件通常又包含载荷机构、指令位移(力)传感器、阻尼器、锁定装置和振杆器等功能部件^[4]。侧杆作为最重要的人机交互界面,其工作特性与飞行品质和飞行安全密切相关。

国外对侧杆人机工效的研究主要集中在满足飞行员高阶使用需求方面,包括利用人体工程学的研究成果减缓飞行员驾驶疲劳感,通过力反馈并结合增强现实(AR)技术增强飞行员对飞机状态的情境感知能力,通过自适应技术实现个性化反馈特性的自动调整等。国内对侧杆人机工效的研究较少,主要集中在满足飞行员操作可达性、防误动作等基础需求方面,且缺少精细化指标和评价标准。

本文首次系统地揭示了人机工效对侧杆设计过程中握点选取、操纵解耦、操纵特性寻优,以及附属开关布置等关键环节的影响,给出了侧杆重要设计参数的计算方法和选取边界,构建了飞行员操纵动作模型并形成了性能评价准

则,能够有效地指导侧杆精细化设计和驾驶舱一体化布置工作,提升飞行员对操纵品质的满意度。

1 握点设计

为了保证最优操纵特性,侧杆手柄外径为30~35 mm且杆头长度大于40 mm,手部握持长度应不小于110 mm^[5]。设计握点时,应以飞行员自然握杆时食指第二指节与手柄前方接触的中心为基准,考虑第50百分位(P50)飞行员设计眼位和座椅中立位置参考点(SRP),置于手臂发力最有效位置^[6]。握点位置与飞行员上肢长度、操纵姿势密切相关,定义飞行员舒适坐姿和操纵姿势模型如图1所示。

由图1可知,握点距SRP的水平距离 W_{SRP} 、纵向距离

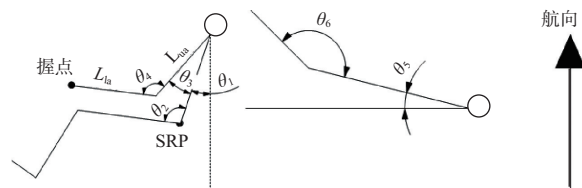


图1 飞行员操纵侧杆示意

Fig.1 Pilot manipulates side stick illustration

收稿日期: 2025-01-03; 退修日期: 2025-03-27; 录用日期: 2025-04-25

引用格式: Shi Zhenyun, Zhang Junhong, Jiang Feihong. Manned aircraft side stick device ergonomics fine design[J]. Aeronautical Science & Technology, 2025, 36(7): 113-118. 师振云, 张军红, 江飞鸿. 有人驾驶飞机侧杆操纵装置人机工效精细化设计[J]. 航空科学技术, 2025, 36(7): 113-118.

L_{SRP} ,以及上下距离 H_{SRP} 可分别表述为

$$W_{SRP} = 0.5 \times W_{hw} + L_{ua} \times \cos(\theta_5 + (180^\circ - \theta_6)) \quad (1)$$

$$L_{SRP} = L_e + L_{ua} \times \sin\theta_5 + L_{la} \times \sin(\theta_5 + (180^\circ - \theta_6)) \quad (2)$$

$$H_{SRP} = H_e - H_{sh} + L_{ua} \times \cos(\theta_1 + \theta_2) - L_{la} \times \cos(\theta_4 - \theta_1 - \theta_2) \quad (3)$$

式中, W_{hw} 、 L_{ua} 、 L_{la} 、 L_e 、 H_e 和 H_{sh} 分别是第5百分位(P5)飞行员的头最大宽、上臂长、前臂加手功能前伸长、眼突枕突距、坐姿眼高和坐姿肩高,统计数据见表1。 θ_1 为座椅初始靠背角,取值为 $5^\circ \sim 10^\circ$; θ_2 为飞行员上半身与大腿夹角,取值为 $80^\circ \sim 82^\circ$; θ_3 为大臂与上身夹角,取值为 $8^\circ \sim 10^\circ$; θ_4 为大臂与前臂夹角,取值为 $110^\circ \sim 113^\circ$; θ_5 为上臂与水平面夹角,取值为 $17^\circ \sim 18^\circ$; θ_6 为大臂与小臂侧夹角,取值为 $140^\circ \sim 150^\circ$ 。

表1 P5飞行员基础项目数据^[7]

Table 1 P5 Pilot fundamental items data^[7]

序号	项目名称	数值/mm
1	头最大宽	149
2	上臂长	293
3	前臂加手功能前伸长	325
4	眼突枕突距	177
5	坐姿眼高	778
6	坐姿肩高	564

由式(1)~式(3)可初步估算出握点相对SRP的水平距离 W_{SRP} 为350~380 mm,纵向距离 L_{SRP} 为375~475 mm,上下距离 H_{SRP} 为265~345 mm。

2 操纵解耦设计

侧杆的工作特点是二自由度、小位移量^[6-7],实际使用中很容易出现纵向和横向的操纵耦合,这是一种令飞行员讨厌的操纵特性。为实现操纵解耦,侧杆应保证俯仰控制转轴和滚转控制转轴正交、共面且物理隔离,如图2所示。前推和后拉时侧杆绕俯仰轴运动,俯仰轴承起支承作用,滚转轴不动;向左和向右压杆时侧杆绕滚转轴转动,滚转轴承起支承作用,纵向转轴不转动。

需要说明的是,由于人体固有生物力学顺应性耦合和操纵习惯的共同作用,飞行员在推、拉杆(或左、右压杆)过程中会不自觉地加入翻腕(或带杆)动作,从而产生低频、小幅值的俯仰和滚转耦合操纵,这种耦合被定义为低耦合,如图3所示。低耦合很难完全消除,一般通过在解算系统中增加操纵死区滤波处理。为了兼顾飞行员操纵感觉,死区应不大于侧杆最大工作行程的3%。

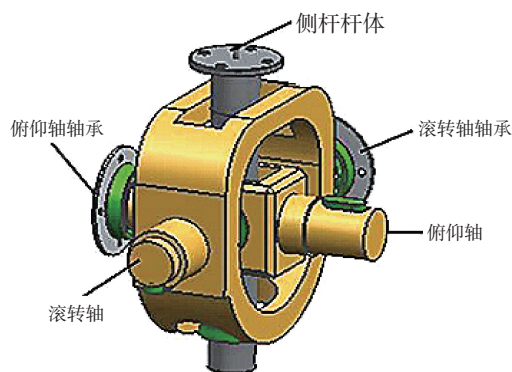


图2 俯仰、滚转二自由度结构

Fig.2 Pitch and roll free degree structure

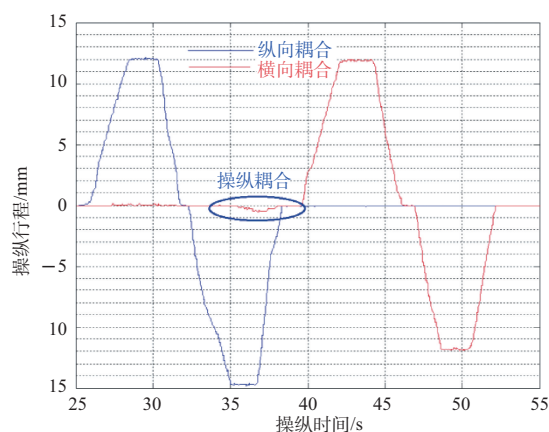


图3 俯仰、滚转操纵耦合示意

Fig.3 Pitch and roll manipulate coupling illustration

使用肘托辅助固化飞行员的手位构型、辨识操纵方向能够进一步减小附加耦合。肘托应向侧杆方向倾斜 5° 左右,通过固定飞行员的前臂来减少左右摆动,有效阻断感应性振动沿手掌—小臂—大臂—肩膀传递而引起的肌肉收缩,消除人体生理特性引起的附加操纵^[8]。经分析,P5、P50和P95的飞行员肩峰眼距(肩峰点和眼位的高度差)差别很小,座椅背靠角在正常调节范围内基本不影响肘托的调节量。P50飞行员合适的前后调节范围是 ± 15 mm,上下调节范围是25 mm(向上)至-15 mm(向下)。实测评估确认,相比于P50飞行员,P5飞行员的舒适握点需抬高19.5 mm,而P95飞行员的舒适握点则需调低17 mm,如图4所示。

3 操纵特性设计

3.1 中立位置安装角度

根据人的操纵习惯,握杆方向应和俯仰操纵方向保持一致。侧杆在中立位置时,要求操纵飞机至最大允许过载

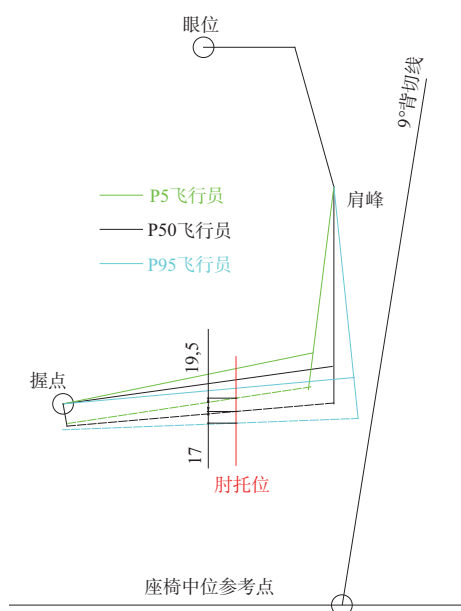


图4 肘托调节量分析

Fig.4 Elbow support adjustment analysis

时腕部在垂直轴前侧的后向运动范围为 $5^\circ \sim 7^\circ$,操纵飞机至最大右向滚转率时腕部在垂直轴右侧的外向运动应不大于 5° 。

为了减小操纵耦合并满足飞行员人机工效需求,侧杆中立位置时滚转轴与俯仰轴之间的夹角必须是 90° 。侧杆垂直轴前倾角度范围是 $10^\circ \sim 17^\circ$,如图5(a)所示,垂直轴左侧(内侧)角度范围是 $8^\circ \sim 12^\circ$,如图5(b)所示。

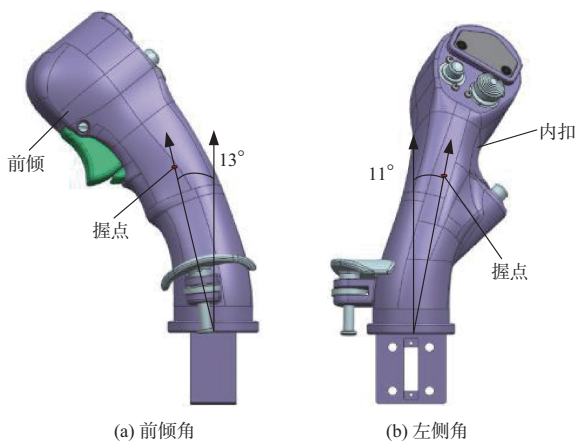


图5 某侧杆中立位置示意

Fig.5 Neutral position of a certain side stick

3.2 杆力-杆位移特性

侧杆设计的一个核心问题是采用何种杆力-杆位移特性使飞行员操纵最舒适,而飞行员个体之间力量差异是显著的,研究表明,人的最大力量是左右不对称的,推

杆和拉杆能力相差约一倍,P5和P95的男性力量相差达3倍^[9-11]。因此,设计和评价合适的杆力-杆位移特性十分困难。过于灵敏的操纵特性是完全不能接受的,而太迟钝的操纵特性也无法令人满意^[12]。杆力-杆位移设计和评价的关键参数包括启动力 F_0 、力-位移梯度 F^X 、最大操纵力 $F_{\max}$ 和最大操纵行程 $\theta_{\max}$ 。定义杆力-杆位移性能评价函数 J

$$J = (F - F_*)^2 + K \times (X_c - X_*)^2 \quad (4)$$

其中

$$X_c = X + X_f = X + C \times F \quad (5)$$

式中,响应需求一定的条件下, F_* 为最优操纵力, X_* 为最优杆位移, F 为真实操纵力, X_c 为真实杆位移。分析飞行员操纵动作可知, X_c 由需求杆位移 X 和人为代入杆位移 X_f 组成,且小行程条件下可近似认为 X_f 与杆力成比例, C 为系数。以正弦信号为输入,则侧杆的动态性能可被描述为

$$X_c = A_* \sin(\omega_* t) \quad (6)$$

$$F = m\ddot{x} + F^X X_c + F_0 \text{sign} X_c + F_{fr} \text{sign} X_c' + F^X X_c' \quad (7)$$

式中, A_* 和 ω_* 为正弦输入的幅值和频率, m 为侧杆质量, F_{fr} 为摩擦力。将式(5)~式(7)代入式(4)中得

$$J = (F_0 + F_{fr} + A_* \sqrt{(F^X - m\omega_*^2)^2 + (F^X \omega_*)^2} - F_*)^2 + K[A_* + C(F_0 + F_{fr} + A_* \sqrt{(F^X - m\omega_*^2)^2 + (F^X \omega_*)^2}) - X_*]^2 \quad (8)$$

式(8)中,评价函数 J 越小,操纵品质越好。利用式(8)求解最优杆力-杆位移梯度 F_{opt}^X 和最优启动力 F_{0opt} 的表达式为

$$F_{opt}^X = \frac{F_* - (1 + K \times C)(F_0 + F_{fr}) + K \times C(X_* - A_*)}{A_* \times (1 + K \times C)} \quad (9)$$

$$F_{0opt} = \frac{F_* - (1 + K \times C)(A \times F^X + F_{fr}) + K \times C(X_* - A_*)}{1 + K \times C} \quad (10)$$

式(9)和式(10)中,要求 $F_{opt}^X > 0$, $F_{0opt} > 0$, $F_0 > F_{fr}$ 保证侧杆能够可靠回中。由式(9)可知,最优杆力-杆位移梯度 F_{opt}^X 随 F_0 和 F_{fr} 增加而减小。结合侧杆安装位置、P5~P95飞行员生理特征及固有操纵习惯,通常要求纵向杆力-杆位移梯度不大于 $10 \text{ N}/(^\circ)$,横向杆力-杆位移梯度不大于 $3 \text{ N}/(^\circ)$ 。最大前后行程范围 $-20^\circ \sim 30^\circ$,最大左、右行程范围 $-20^\circ \sim 20^\circ$ 。启动力范围 $4 \sim 10 \text{ N}$,前推最大操纵力范围 $35 \sim 85 \text{ N}$,后拉最大操纵力范围 $50 \sim 100 \text{ N}$ 。前臂在向左和向右方向上的最大输出力比应为 $3:2$ 且在 $25 \sim 45 \text{ N}$ 之间。对比A320飞机侧杆的杆力-杆位移特性见表2^[13]。

3.3 阻尼设计

阻尼包括自然响应频率(侧杆自然特性决定)和阻尼系

表2 A320飞机侧杆的力—位移特性

Table 2 Side stick force-position characteristics of A320

序号	指标名称	数值
1	纵向启动力/N	3.5
2	横向启动力/N	3
3	纵向操纵角度/(°)	±16
4	横向操纵角度/(°)	±20
5	纵向力梯度/(N/(°))	6.84
6	横向力梯度/(N/(°))	向内 2.45, 向外 1.48

数(阻尼器提供)。根据工程经验,自然响应频率 P 应大于20 rad/s,阻尼系数 ζ 应在0.6~1.2之间。以某侧杆为例,其启动力 $F_0=4$ N,最大横向操纵力 $F_{\max}=42$ N,最大压杆行程 $x=30$ mm,重量 $m=0.7$ kg,握点到阻尼器转轴点的传动比 $i=4.375$,其自然响应频率 P

$$P = \sqrt{\frac{k}{m}} = \sqrt{\frac{F_{\max} - F_0}{mx}} = \sqrt{\frac{(42 - 4)}{0.7 \times 30 \times 10^{-3}}} = 42.5 \text{ rad/s} \quad (11)$$

加装阻尼器后,侧杆阻尼比 c 可表示为

$$c = 2 \times \zeta \sqrt{mk} \times i^2 \quad (12)$$

由式(12)和已知参数,计算出阻尼器的阻尼比 c 应在684.1~1368之间。

3.4 锁定机构设计

大机动特性使用场景中,为防止惯性载荷导致侧杆非指令输出,需要通过专用机构将其锁定在中立位置。图6中锁定机构接受上位机电信号后产生制动力矩:通电时制动器制动,通过直齿轮增速器锁定输入轴及摇臂,并上报“锁定”状态反馈信号;断电时制动器转轴松浮,直齿轮增速器、输入轴和摇臂都能够自由转动,不影响飞行员的正常操纵。为防止锁定机构无法脱开影响飞行安全,摇臂输入轴处设计有剪切销,确保飞行员强力操纵剪断安全销后实现超控控制。锁定机构“锁定”和“解锁”转换时间不大于1 s,锁定力矩20~25 N·m,剪切力矩不大于30 N·m,剪切后产生的附加力矩不大于1 N·m。

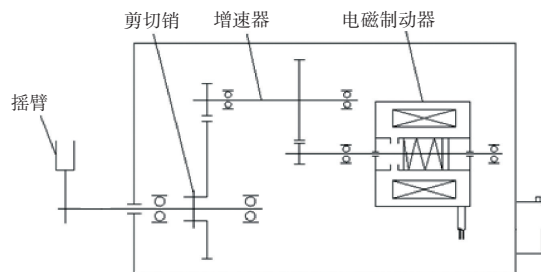


图6 锁定装置结构示意图

Fig.6 Neutral position lock-device principle illustration

4 附属开关

附属开关的选型和布置应充分考虑侧杆使用时的人机工效需求。开关选型方面,只有“通/断”两个位置的开关选用按压式,有三个位置的开关选用扳动式,有三个以上位置的开关选用波段式。有特殊安全要求时应采用专用开关或带保险盖的开关,不影响安全的普通防误操作开关应采用具有自锁功能的扳动式开关。开关类型还应符合手指功能,扳动开关一般由拇指和食指操作,按压开关可以由所有手指操作。

是否可达是评价开关布置合理性的重要准则。飞行员手指的灵活程度从高到低依次是拇指、食指、中指、无名指和小指。人机工效研究表明,通话开关一般由食指操作,其他开关由拇指操作。手柄握持仿真要求,自然握姿下拇指搭在指托上,其余四指自然向前抓握杆体,以拇指扳动的最左侧开关为基准点,以拇指指根为圆点,指长为半径扫略过全部的开关均自然可达到且不会误操作。相邻开关的最大间隔由拇指指尖活动最大距离和指尖距限定,最小间隔通过拇指指关节宽约束,如图7所示。某侧杆手柄开关布置完成后,飞行员自然握姿时拇指和食指弯曲上抬或左右移动10 mm范围内能够操作所有开关,满足可达性要求。

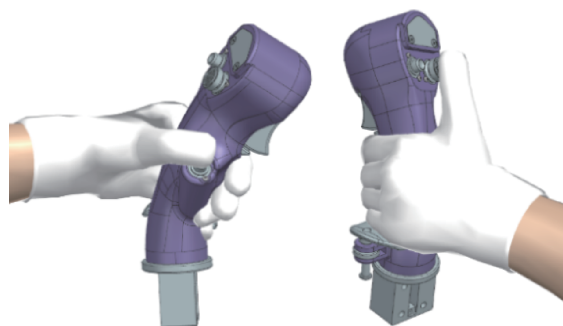


图7 某手柄开关布局示意

Fig.7 Switch arrangement of a certain side stick

5 结论

本文基于飞行员操作动作建模和操纵品质理论研究,系统地分析了人机工效对侧杆精细化设计的影响。通过研究,得出以下结论:

- (1) 握点应以P50飞行员的设计眼位和座椅中立位置为基准,综合考虑飞行员生理特征、舒适坐姿和操纵姿势等因素后,通过构建飞行员模型完成最优设计。
- (2) 为了降低操纵过程中的纵向和横向耦合度,需要从

机构隔离、死区滤波和可调肘托辅助训练等多方面综合入手,尽可能阻断人体生理特性引起的附加操纵。

(3) 最优杆力—杆位移梯度随启动力和摩擦力的增加而减小。为了满足最优杆力—杆位移特性并精确回中,应尽可能减小运动机构的摩擦力。

AST

参考文献

- [1] 孟小宝,邹泉,何欢欢,等. 安装主动侧杆的飞机的人机交互控制系统研究[J]. 航空科学技术, 2023, 34(8):57-67.
Meng Xiaobao, Zou Quan, He Huanhuan, et al. Study on the human-machine interaction control system of aircraft equipped with side stick[J]. Aeronautical Science & Technology, 2023, 34(8): 57-67.(in Chinese)
- [2] 吴佳驹,苏幸君,朱妍. 驾驶员辅助系统的研究现状和发展展望[J]. 航空科学技术, 2021, 32(7): 12-20.
Wu Jiaju, Su Xingjun, Zhu Yan. Research status and development prospect of pilot assistance system[J]. Aeronautical Science & Technology, 2021, 32(7): 12-20.(in Chinese)
- [3] 郭小朝,熊端琴,陆惠良. 国外飞机侧杆驾驶装置的基本参数和设计要求[J]. 人类工程学, 2006, 12(2):33-35.
Guo Xiaochao, Xiong Duanqin, Lu Huiliang. Foreign aircraft side stick device fundamental parameters and design requirements[J]. Chinese Journal of Ergonomics, 2006, 12(2): 33-35.(in Chinese)
- [4] 李林,王镭. 采用被动侧杆的民机设计中的人为因素考虑[J]. 民用飞机设计与研究, 2012, 10(2):67-69.
Li Lin, Wang Lei. Human factor in the passive side stick design for civil airplanes[J]. Civil Aircraft Design & Research, 2012, 10(2): 67-69. (in Chinese)
- [5] 徐州,陆伟铭,谢陵. 双自由度侧杆操纵力测量系统设计与实现[J]. 民用飞机设计与研究, 2016, 12(1): 72-74.
Xu Zhou, Lu Weiming, Xie Ling. Design and realization of control force measurement system of side stick with two degree of freedom[J]. Civil Aircraft Design & Research, 2016, 12(1):72-74.(in Chinese)
- [6] GJB10451—2022 军用飞机侧驾驶杆人机工效要求[S]. 北京:国家军用标准出版发行部, 2022.
- [7] GJB4856—2003 中国男性飞行员人体尺寸[S]. 北京:国家军用标准出版发行部, 2003.
GJB4856-2003 Human dimensions of Chinese male pilot population[s]. Beijing: National Military Standards Publishing and Distribution Department, 2003.(in Chinese)
- [8] 熊端琴,郭小朝,陆惠良. 飞机侧杆驾驶装置的优缺点及改进设计探讨[J]. 人类工程学, 2006, 12(1):36-38.
Xiong Duanqin, Guo Xiaochao, Lu Huiliang. Advantages and disadvantages of aircraft side stick device and the discussion on how to improvement [J]. Chinese Journal of Ergonomics, 2006, 12(1): 36-38.(in Chinese)
- [9] 党维. 侧杆人机工效影响因素分析[J]. 工程与试验, 2020, 20(1): 1-3.
Dang Wei. The influence factor analysis of man-machine efficiency of side stick[J]. Engineering & Test, 2020, 20(1): 1-3. (in Chinese)
- [10] 赵翔,张文星. 侧杆人感特性分析[J]. 科技与创新, 2020, 60(1): 1-3.
Zhao Xiang, Zhang Wenxing. Side stick human feel characteristics analysis[J]. Science and Technology & Innovation, 2020, 60(1):1-3. (in Chinese)
- [11] Hegg J W, Smith M P, Yount L, et al. Features of active side stick controllers [J]. Aerospace and Electronic System Magazine, 1995, 10(7):31-34.
- [12] Martin D M, Downing D R. Analysis and design of side stick controller systems for general aviation aircraft[J]. Journal of Guidance, Control and Dynamics, 1990, 13(1):16-21.
- [13] Kanbayashi H, Tobari S, Moriyama M. Helicopter side stick controller[C]// Proceeding of 55th AHS International Annual Forum, 1999: 1508-1514.

Manned Aircraft Side Stick Device Ergonomics Fine Design

Shi Zhenyun, Zhang Junhong, Jiang Feihong

The AVIC First Aircraft Institute, Xi'an 710089, China

Abstract: Ergonomics determines side stick's performance directly, and it has close relationship with flight safety and flying qualities. Based on pilot manipulate model and engineering experience, the paper provides detailed and systemic analysis of ergonomics's influence on side stick fine design links, including grip point chosen, longitudinal direction and landscape direction decoupling design, neutral position initial angle design, force - displacement characteristics, damping coefficient, neutral position locking and switches arrangement. Under consideration of ergonomics's influence and design constraints, the paper also illustrates side stick's main parameters advised range. According to side stick dynamic performance research, the paper provides optimal evaluation criterion and shows particularities of side stick's ergonomics. The paper has high reference value for side stick research and optimization design.

Key Words: side stick; ergonomics; fine design; manipulate performance; optimal evaluation criterion