

文章编号:1000-6893(2009)04-0768-05

可重构混联机械手——Tricept 的自标定方法

洪振宇

(中国民航大学 交通工程学院, 天津 300300)

Self-calibration of Reconfigurable Hybrid Robot—Tricept

Hong Zhenyu

(College of Transportation Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

摘 要: 由于并联构型装备难于实现全闭环反馈控制,使运动学标定成为一项具有显著经济价值并十分有效的提高并联构型装备精度的手段,通常包括误差建模、测量、辨识和补偿 4 个环节。基于以上因素,以 5 自由度混联机械手 Tricept 为对象,研究一种基于内部传感器检测信息的运动学标定方法。首先建立传感器测量值与影响末端可补偿位姿误差的几何误差源的映射关系。在此基础上,讨论了几何误差的可辨识性。通过计算机仿真验证了所提方法的可行性和有效性。

关键词: 并联机构; 自标定; 误差建模; 参数辨识; 计算机仿真

中图分类号: TH113 **文献标识码:** A

Abstract: As it is difficult to realize full closed-loop feedback control for parallel kinematic machines (PKM), their kinematic calibration becomes one effective means of significant economic value to enhance PKM precision. In general, kinematic calibration consists of four steps, i. e. error modeling, measurement, identification, and compensation. By taking a 5-degree of freedom (DOF) reconfigurable hybrid robot named Tricept as an object of study, this article presents a kinematic calibration method based on joint sensors. The first order error function is formulated, which maps the measured data and the geometric source errors affecting the compensable pose errors. Based on the error mapping function, the identifiability of geometric parameters of Tricept is investigated. The validity and effectiveness of the proposed approach is verified by computer simulation.

Key words: parallel kinematic machines; self-calibration; error model; parameter identification; computer simulation

并联构型装备具有重量轻、刚度/重量比大、速度快、可重构性强等优点^[1-2],已被成功应用于航空航天工业中,其中在商业上最成功的要属 Tricept 机器人^[3-4]。例如由多个 Tricept 机器人组成的加工单元,已用于波音飞机主梁以及空客 A380 型飞机左右机翼的加工^[5]。随着空客 A320 总装线落户天津及中国大飞机项目的启动,迫切需要中国提供相关具有自主知识产权的加工装备。尽管 Tricept 机器人得到了广泛应用,但关于如何提高精度的研究鲜有报道。

运动学标定是一项具有显著经济价值并十分有效的提高并联构型装备精度的手段。目前,有关并联机构运动学标定方法的研究主要

集中在使用不同类型的外部或内部传感器测量系统的末端位姿误差或被动铰链的输出误差,以期经济、高效地实现误差补偿。H. Zhuang 等^[6]利用电子经纬仪测量了 Stewart 平台的位姿误差全集,并提出可避免求解正解的参数辨识方法,但所用设备极其昂贵。Y. J. Chiu 等^[7-8]采用触发探针和平尺等标准量具,约束末端执行器的部分自由度,进而辨识出几何参数误差,但需要多种测量装置,故容易引入测量误差。H. Zhuang^[9]在 6 自由度 Stewart 平台的胡克铰上安装旋转编码器,测量从动铰链转角误差。该方法能够得到精度足够高并覆盖整个工作空间的测量数据,并且测量速度快,不会引入额外的误差,具有良好的经济性。而对于 Tricept 机器人这类含有恰约束支链的少自由度并联机构,如何安装传感器才能获得标定所需的全部信息,成为有待研究的问题。

本文以 Tricept 机械手为对象,研究利用安

收稿日期:2008-07-03; 修订日期:2008-09-10

基金项目:中国民航大学科研启动基金(07qd07s);天津市高等学校科技发展基金项目(20071102)

通讯作者:洪振宇 E-mail:apple_hzy@hotmail.com

装在恰约束支链上的角度编码器和直线光栅尺作为检测设备的运动学标定方法,侧重研究其中 3 自由度并联机构的误差建模和参数辨识问题。最后,通过计算机仿真验证所提方法的可行性和有效性。

1 误差建模

1.1 系统简介与误差源分析

Tricept 机械手由一个 3 自由度并联机构和一个 2 自由度转头串接而成。其中 3 自由度并联机构由机架、动平台及连接机架和动平台的 4 条支链组成。4 条支链包括 1 条 UP 支链和 3 条 UPS 支链,其中 UP 支链一端与机架通过胡克铰相连,另一端与动平台固接;3 条 UPS 支链结构相同,一端与机架通过胡克铰相连,另一端与动平台通过球铰链相连。U, S, P 和 P 分别表示胡克铰、球铰、主动和被动移动铰。

考虑到 UP 支链的位姿是耦合的,若将动平台的位置视为可控自由度,则动平台的姿态误差可分为可补偿和不可补偿两部分,因此可以将该机构的几何参数误差分为 2 类:第 1 类包括铰链中心的位置误差和支链的杆长误差;第 2 类包括 UP 支链连架胡克铰的加工装配误差和套筒两侧导轨的扭角误差,参见图 1。由于第 2 类误差影响动平台不可补偿姿态误差,必须在制造装配过程中加以严格控制。因此,在机构装配完成后,第 1 类误差是影响动平台位置误差的主要误差源。为此,在误差建模中仅对这些误差源加以考虑^[10-12]。

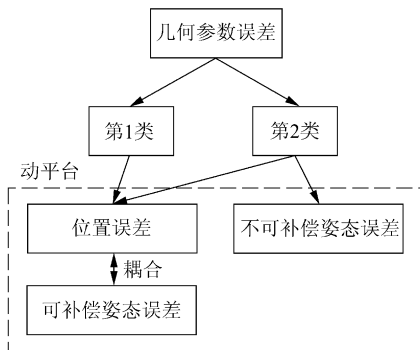


图 1 几何参数误差
Fig. 1 Geometric errors

1.2 误差模型

在 Tricept 机械手中 UP 支链为恰约束从动

支链,对动平台的约束完全由该支链提供,以下将利用矢量链法建立几何误差源与该支链从动铰链输出量间的误差映射模型,从而为运动学标定提供数学模型。Tricept 机械手中 3 自由度并联机构的结构简图如图 2 所示。图中:点 $B_i (i=1, 2, 3, 4)$ 表示支链连架胡克铰的中心; $A_i (i=1, 2, 3)$ 表示 UPS 支链与动平台相连球铰的中心。在静、动平台上分别建立固定参考系 $Oxyz$ 和连体系 $O'x'y'z'$ 。

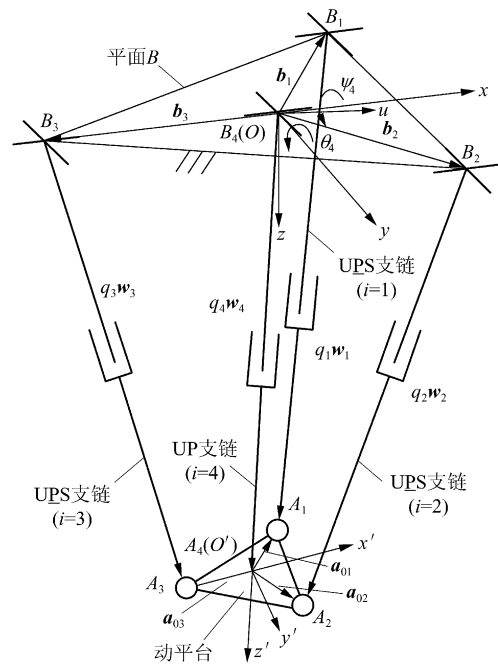


图 2 Tricept 机械手结构示意图
Fig. 2 Schematic diagram of robot Tricept

在系 $Oxyz$ 下,构造位置闭环约束方程

$$r = b_i + q_i w_i - R a_{oi} \tag{1}$$

式中: q_i 和 w_i 分别为支链 $i (i=1, 2, 3)$ 的杆长和单位矢量; b_i 和 a_{oi} 分别为点 B_i 在系 $Oxyz$ 下和点 A_i 在系 $O'x'y'z'$ 下的位置矢量; r 为点 O' 在系 $Oxyz$ 下的位置矢量; R 为系 $O'x'y'z'$ 关于系 $Oxyz$ 的姿态矩阵。对式(1)取一阶摄动,得

$$\Delta r = \Delta b_i + \Delta q_i w_i + q_i \Delta w_i - \theta \times R a_{oi} - R \Delta a_{oi} \tag{2}$$

式中: Δq_i 和 Δw_i 分别为支链 $i (i=1, 2, 3)$ 的杆长和单位矢量的误差; Δb_i 和 Δa_{oi} 分别为点 B_i 在系 $Oxyz$ 下和点 A_i 在系 $O'x'y'z'$ 下的误差矢量; Δr 为点 O' 在系 $Oxyz$ 下的误差矢量; θ 为系 $O'x'y'z'$ 的姿态误差矢量。对式(1)两端点乘 $w_i (i=1, 2, 3)$, 得

$$\mathbf{w}_i^T \Delta \mathbf{r} = \mathbf{w}_i^T \Delta \mathbf{b}_i + \Delta q_i - \mathbf{w}_i^T \mathbf{R} \Delta \mathbf{a}_{0i} - (\mathbf{R} \mathbf{a}_{0i} \times \mathbf{w}_i)^T \boldsymbol{\theta} \quad (3)$$

由 UP 支链可知

$$\Delta \mathbf{r} = \Delta q_4 \mathbf{w}_4 + q_4 \Delta \mathbf{w}_4 \quad (4)$$

将式 $\Delta \mathbf{w}_4 = \boldsymbol{\theta} \times \mathbf{w}_4$ 代入式(4),得

$$\Delta \mathbf{r} = \Delta q_4 \mathbf{w}_4 + q_4 \boldsymbol{\theta} \times \mathbf{w}_4 \quad (5)$$

将式(5)代入式(3),得

$$\mathbf{w}_i^T \mathbf{w}_4 \Delta q_4 + [(\mathbf{q}_4 \mathbf{w}_4 + \mathbf{R} \mathbf{a}_{0i}) \times \mathbf{w}_i]^T \boldsymbol{\theta} = \mathbf{w}_i^T \Delta \mathbf{b}_i + \Delta q_i - \mathbf{w}_i^T \mathbf{R} \Delta \mathbf{a}_{0i} \quad (6)$$

由于 $\mathbf{q}_4 \mathbf{w}_4 + \mathbf{R} \mathbf{a}_{0i} = \mathbf{b}_i + \mathbf{q}_i \mathbf{w}_i$, 则式(6)可以写为

$$\mathbf{w}_i^T \mathbf{w}_4 \Delta q_4 + (\mathbf{b}_i \times \mathbf{w}_i)^T \boldsymbol{\theta} = \mathbf{w}_i^T \Delta \mathbf{b}_i + \Delta q_i - \mathbf{w}_i^T \mathbf{R} \Delta \mathbf{a}_{0i} \quad (7)$$

由于

$$\boldsymbol{\theta} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \cos \phi_4 \\ 0 & \sin \phi_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \phi_4 \\ \Delta \theta_4 \end{bmatrix} = \mathbf{J}_\theta \boldsymbol{\theta}' \quad (8)$$

$$\text{式中: } \mathbf{J}_\theta = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \cos \phi_4 \\ 0 & \sin \phi_4 \end{bmatrix}; \boldsymbol{\theta}' = \begin{bmatrix} \Delta \phi_4 \\ \Delta \theta_4 \end{bmatrix}.$$

将式(8)代入式(7),得

$$\boldsymbol{\delta} = \mathbf{J} \Delta \boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{J}_1 \mathbf{J}_2 \Delta \boldsymbol{\varepsilon} \quad (9)$$

式中:

$$\boldsymbol{\delta} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\theta}' \\ \Delta q_4 \end{bmatrix}, \mathbf{J}_1 = \begin{bmatrix} (\mathbf{b}_1 \times \mathbf{w}_1)^T \mathbf{J}_\theta & \mathbf{w}_1^T \mathbf{w}_4 \\ (\mathbf{b}_2 \times \mathbf{w}_2)^T \mathbf{J}_\theta & \mathbf{w}_2^T \mathbf{w}_4 \\ (\mathbf{b}_3 \times \mathbf{w}_3)^T \mathbf{J}_\theta & \mathbf{w}_3^T \mathbf{w}_4 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{J}_2 = \text{diag}[\mathbf{d}_i], \Delta \boldsymbol{\varepsilon} = [\Delta \boldsymbol{\varepsilon}_1 \quad \Delta \boldsymbol{\varepsilon}_2 \quad \Delta \boldsymbol{\varepsilon}_3]^T$$

$$\mathbf{d}_i = [\mathbf{w}_i^T \quad -\mathbf{w}_i^T \mathbf{R} \quad 1]$$

$$\Delta \boldsymbol{\varepsilon}_i = [\Delta \mathbf{b}_i^T \quad \Delta \mathbf{a}_{0i}^T \quad \Delta q_i]^T (i = 1, 2, 3)$$

至此建立了几何误差源与 UP 支链从动铰链输出量间的误差映射模型。

2 自标定方法

若在 Tricept 机械手 UP 支链连架胡克铰的 2 个回转轴上安装角度编码器以及在移动副上安装直线光栅尺, 则在第 j ($j = 1, 2, \dots, n$) 位形下, 传感器的测量值可以表示为在该位形下的输出误差减去初始位形下的输出误差, 即

$$\mathbf{l}_j = \boldsymbol{\delta}_j - \boldsymbol{\delta}_0 = (\mathbf{J}_j - \mathbf{J}_0) \Delta \boldsymbol{\varepsilon} \quad (10)$$

将式(10)写成矩阵的形式有

$$\mathbf{l} = \mathbf{H} \Delta \boldsymbol{\varepsilon} \quad (11)$$

式中:

$$\mathbf{l} = \begin{bmatrix} \mathbf{l}_1 \\ \mathbf{l}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{l}_n \end{bmatrix}, \mathbf{H} = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_1 - \mathbf{J}_0 \\ \mathbf{J}_2 - \mathbf{J}_0 \\ \vdots \\ \mathbf{J}_n - \mathbf{J}_0 \end{bmatrix}$$

则最小二乘解为

$$\Delta \boldsymbol{\varepsilon} = (\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{l} \quad (12)$$

值得指出的是, 内部传感器的测量信息, 不包含系 $Oxyz$ 的刚体位移信息, 因此无法识别出连架铰中心在该系中位置误差信息全集。为此, 参照图 2, 对系 $Oxyz$ 和系 $O'x'y'z'$ 的设置做如下约定: 令 Oxy 平面为由点 B_i ($i = 1, 2, 4$) 张成的平面 B , y 轴平行于点 B_1 与 B_2 连线, z 轴与平面 B 垂直, x 轴满足右手定则。又令 $O'x'y'$ 平面为由点 A_i ($i = 1, 2, 3$) 张成的平面 A , O' 为轴 \mathbf{w}_4 与平面 A 的交点。同时约定当系统无误差且 \mathbf{R} 为单位阵时, 两系对应坐标轴平行。根据上述定义, 有

$$\Delta z_{B1} = \Delta z_{B2} = \Delta z'_{A1} = \Delta z'_{A2} = \Delta z'_{A3} = 0 \\ \Delta x_{B1} = \Delta x_{B2}$$

采用上述处理后, 系统共有 15 项独立的几何参数误差, 包括: Δq_i ($i = 1, 2, 3$); Δx_{B1} ; Δx_{B3} ; Δz_{B3} ; Δy_{B1} ; $\Delta x'_{Ai}$; $\Delta y'_{Ai}$ ($i = 1, 2, 3$)。由上述分析可见, 设置系 $Oxyz$ 的目的在于消除机架的刚体位移, 而设置系 $O'x'y'z'$ 的目的则是为了消除几何误差间的相关性。

3 计算机仿真

通过计算机仿真验证所提出的运动学标定方法的有效性。该机构的名义尺度参数见表 1, 表中: a 和 b 分别为等边三角形 $\triangle A_1 A_2 A_3$ 和 $\triangle B_1 B_2 B_3$ 的外接圆半径; R 和 h 分别为圆柱形工作空间的半径和高; H 为工作空间与机架的距离。假定一组几何参数误差见表 2, 在测量值中加入均值为 0 的正态分布随机噪声, 并取 3 次均值作为模拟测量数据, 对于角度量随机噪声标准差为 $0.8''$, 对于长度量随机噪声标准差为 $0.5 \mu\text{m}$ 。补偿前后的动平台体积误差 $dV = \sqrt{\Delta \mathbf{r}^T \Delta \mathbf{r}}$ 在工作空间中间平面的分布如图 3 所示。由图 3 可知, 补偿前后体积误差最大、最小、均值分别为 1.179 mm , 0.573 mm , 0.693 mm 和 0.278 mm , 0.171 mm , 0.203 mm 。由此验证了本文提出的运动学标定方法的有效性。

表 1 Tricept 的尺度参数

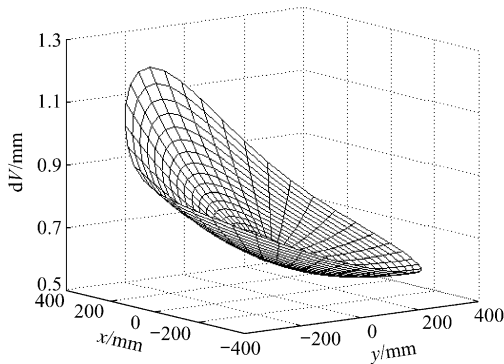
Table 1 Dimensional parameters of Tricept module mm

R	h	H	a	b
400	200	650	100	288.7

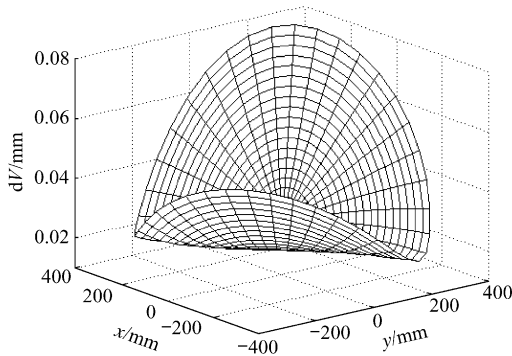
表 2 假定的几何参数误差

Table 2 Tentative geometric errors mm

Δx_{B1}	Δy_{B1}	Δy_{B2}	Δx_{B3}	Δy_{B3}	Δz_{B3}	Δx_{A1}	Δy_{A1}
0.2	0.1	0.2	0.2	0.27	0.2	0.25	-0.2
Δx_{A2}	Δy_{A2}	Δx_{A3}	Δy_{A3}	Δq_1	Δq_2	Δq_3	
-0.25	0.25	-0.31	0.2	0.45	0.7	0.5	



(a) 补偿前



(b) 补偿后

图 3 补偿前后的误差分布

Fig. 3 Error distribution before and after compensation

通过理论分析和计算机仿真已经验证自标定方法的有效性。关键问题就是如何确定测量仪器的精度等级,由于直线光栅尺较容易获得,而高精度的角度编码器较昂贵,为此以下将讨论如何选择角度编码器的精度等级。首先定义残余误差

$$\mu = \frac{\|\Delta\boldsymbol{\varepsilon} - \Delta\boldsymbol{\varepsilon}_e\|_1}{n_\varepsilon}$$

式中: $n_\varepsilon = \dim(\Delta\boldsymbol{\varepsilon})$; $\Delta\boldsymbol{\varepsilon}$ 为假定的系统几何参数误差; $\Delta\boldsymbol{\varepsilon}_e$ 为几何参数误差的预估值。对于表 2 中

的几何参数误差,其对应 $\mu_0 = 0.285 (\Delta\boldsymbol{\varepsilon}_e = \mathbf{0})$ 。分别选用不同精度的旋转编码器,对应的参数辨识仿真结果见图 4,其中当精度为 $4''$ 时 $\mu = 0.291$,已经大于 μ_0 。综合考虑传感器的价格和标定结果,选用精度为 $2''$ 的旋转编码器较为合理。

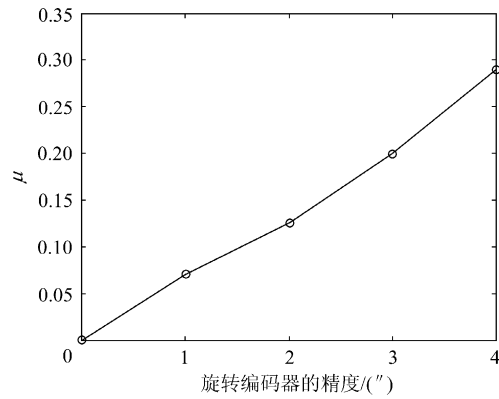


图 4 仿真结果

Fig. 4 Results of simulation

4 结 论

(1) 利用矢量链法建立了传感器测量值与影响末端可补偿位姿误差的几何误差源的映射关系,并通过对坐标系的定义,得到 15 项独立的、可辨识的几何参数误差。

(2) 提出的运动学标定方法经济、有效,对掌握含有约束支链的少自由度并联机构及其他并联机构的运动学标定理论有一定的指导意义。

参 考 文 献

- [1] Weck M, Staimer D. Parallel kinematic machine tools-current state and future potentials[J]. Annals of the CIRP, 2002, 51(2): 671-683.
- [2] Weck M, Staimer D. Accuracy issues of parallel kinematic machine tools[J]. IMechE Journal of Multi-body Dynamics; Part K, 2002, 216(1): 51-57.
- [3] Neumann K E. Robot; US, 4732525 [P]. 1986-3-22.
- [4] Neumann K E. Tricept application[C]//The 3rd Chemnitz Parallel Kinematics Seminar. Zwickau, Germany: Fraunhofer IWU, 2002: 547-551.
- [5] 李曦, 可重构混联机械手模块 TriVariant 的设计理论与方法[D]. 天津: 天津大学机械工程学院, 2005. Li Meng. Design theory and methodology of the TriVariant—a 5-DOF reconfigurable PKM module[D]. Tianjin: School of Mechanical Engineering, Tianjin University, 2005. (in Chinese)
- [6] Zhuang H, Yan J, Masory O. Calibration of Stewart platforms and other parallel manipulators by minimizing inverse kinematic residuals[J]. Journal of Robotic Systems, 1998, 15(7): 395-405.

- [7] Chiu Y J, Perng M H. Self-calibration of a general hexapod manipulator using cylinder constraints[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2003, 43(10): 1051-1066.
- [8] Chiu Y J, Perng M H. Self-calibration of a general hexapod manipulator with enhanced precision in 5-DOF motions[J]. Mechanism and Machine Theory, 2004, 39(1): 1-23.
- [9] Zhuang H. Self-calibration of parallel mechanisms with a case study on Stewart platforms[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1997, 13(3): 387-397.
- [10] 洪振宇, 梅江平, 赵学满, 等. 可重构混联机械手 TriVariant 的误差建模与灵敏度分析[J]. 机械工程学报, 2006, 42(12): 65-69.
Hong Zhenyu, Mei Jiangping, Zhao Xueman, et al. Error modeling and sensitivity analysis of reconfigurable hybrid robot module trivariant[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(12): 65-69. (in Chinese)
- [11] 洪振宇, 梅江平, 赵学满, 等. 基于球杆仪检测信息的并联机构运动学标定[J]. 机械工程学报, 2007, 43(7): 16-22.
Hong Zhenyu, Mei Jiangping, Zhao Xueman, et al. Kinematic calibration of the parallel mechanism using double-ball-bar system[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(7): 16-22. (in Chinese)
- [12] 洪振宇. 可重构混联机械手模块 Tricept 与 TriVariant 的误差建模与性能比较[J]. 天津大学学报, 2007, 40(10): 1176-1182.
Hong Zhenyu. Error modeling and performance comparison of 3-DOF modules of two reconfigurable PKM—the Tricept and the Trivariant [J]. Journal of Tianjin University, 2007, 40(10): 1176-1182. (in Chinese)

作者简介:

洪振宇(1978—) 男, 博士, 讲师。主要研究方向: 并联机构精度设计及运动学标定。

Tel: 022-24092044

E-mail: apple_hzy@hotmail.com

(责任编辑: 蔡斐, 杨冬)



纪念中国航空先驱冯如首飞百年——航空 安全新技术论坛征文通知

为配合中国航空学会纪念“中国航空先驱冯如先生首飞百年”活动, 交流近年来国内外航空安全技术的最新成果, 推动国内航空安全技术和安全水平进一步提高, 中国航空学会航空维修工程专业委员会拟于 2009 年第四季度结合纪念活动, 举办“航空安全新技术论坛”。现将征文要求及有关事项通知如下:

一、征文内容

1. 世界航空安全发展趋势及国内外民航、军航航空安全形势;
2. 国内外飞行安全管理技术;
3. 航空装备安全性设计实现及验证技术;
4. 飞行安全训练及飞行安全评估新技术;
5. 航空安全保障新技术;
6. 飞行事故预防与调查新技术。

二、征文要求

1. 论文要理论联系实际, 文字简练, 重点突出, 观点明确, 内容新颖, 反映本专业近期的研究成果及发展方向。
2. 论文由题目、中文摘要(300 字以内)、关键词、正文、参考文献、作者简介(姓名、性别、出生年月、专业、单位、职务、职称、电话、电子邮箱、邮编)组成, 正文限 6000 字以内。
3. 2006 年以后在全国性公开刊物或全国性学术会议上发表过的论文, 不在征集范围之内。
4. 投稿时须提交论文的文字稿、电子版(采用 word 排版), 保密审查证明(有密级的论文, 请作者单位自行处理, 文责自负)及作者的详细联系方式(通讯地址、电话、传真等)。
5. 联系方式:
联系人: 薛玲
联系电话: 010-66713350, 67966908, 军线: 0201-713350, 手机: 13641287474
来稿请寄: 北京 9203 信箱学会办薛玲收(邮编: 100076)
E-mail: kysqs@yahoo.com.cn

三、来稿经评审录用后编辑成论文集, 论文集由国防工业出版社正式出版, 有统一书号。征文截止日期: 2009 年 7 月 3 日。

中国航空学会
航空维修工程专业委员会