

DOI:10.16356/j.1005-2615.2020.03.020

冲压空气涡轮释放过程运动学分析

马智勇¹, 邓健², 周光明²

(1. 海装驻南京地区第四军事代表室, 南京, 210000; 2. 南京航空航天大学机械结构力学及控制国家重点实验室, 南京, 210016)

摘要: 冲压空气涡轮作为飞机上的应急能源, 能在出现紧急情况时提供电能, 保证飞机上电传操控和电子设备的正常工作。本文以冲压空气涡轮为研究对象, 基于机械运动原理对系统模型进行了简化, 基于刚体假设, 结合 MATLAB 软件从理论上研究结构在释放过程中的运动学问题。给出了冲压空气涡轮系统释放过程中各个关节空间位置的理论求解方法, 得到了关节在空间中的运动轨迹和对应的速度时间曲线、加速度时间曲线, 结果表明: 冲压空气涡轮系统的释放过程在 1 s 以内, 释放速度较快, 且各关节在释放初始阶段速度、加速度响应较大。本文的工作可为后期不同冲压空气涡轮系统构型的初步设计提供理论依据, 指导冲压空气涡轮释放的仿真计算和试验。

关键词: 冲压空气涡轮; 运动学分析; 理论求解; 运动轨迹

中图分类号: V225, V228 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2020)03-0499-08

Releasing Kinematics Analysis of Ram Air Turbine

MA Zhiyong¹, DENG Jian², ZHOU Guangming²

(1. The Fourth Representative Office of the Navy in Nanjing, Nanjing, 210000, China; 2. State Key Laboratory of Mechanics and Control of Mechanical Structures, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

Abstract: The ram air turbine (RAT) acts as an emergency energy source on the aircraft and provides electrical energy in the event of an emergency to ensure the on-board transmission control and the normal operation of the electronic equipment. The ram air turbine is taken as the research object, and the system model is simplified based on the principle of mechanical motion. The kinematics problem of the structure in the release process is theoretically studied using MATLAB. The theoretical solution method for the spatial position of each joint in the RAT system release process is given. The motion trajectory of the joint in space and the corresponding velocity time curve and acceleration time curve are obtained. The results show that the release process of the RAT system is within 1 s. The release speed is fast, and the speed and acceleration response of each joint in the initial stage of release are quite large. This work can provide theoretical basis for the preliminary design of different RAT system configurations in the later stage, and guide the simulation calculation and experiment of RAT release.

Key words: ram air turbine; kinematic analysis; theoretical solution; motion track

随着多电飞机的迅速发展和电传操控的广泛运用, 飞机上用电器负载增加, 对电源系统提出了更高的要求^[1]。当出现紧急情况时, 若单靠蓄电池作

为应急电源, 往往不能满足用电需求。冲压空气涡轮 (Ram air turbine, RAT)^[2]作为飞机上的应急能源, 能在飞机处于应急状态时向飞机提供应急电

基金项目: 江苏高校优势学科建设工程资助项目; 中国博士后科学基金(2019M661818)资助项目。

收稿日期: 2019-10-25; **修订日期:** 2019-11-03

通信作者: 周光明, 男, 教授, 博士生导师, E-mail: zhougm@nuaa.edu.cn。

引用格式: 马智勇, 邓健, 周光明. 冲压空气涡轮释放过程运动学分析[J]. 南京航空航天大学学报, 2020, 52(3): 499-506. MA Zhiyong, DENG Jian, ZHOU Guangming. Releasing kinematics analysis of ram air turbine[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2020, 52(3): 499-506.

能,保证电传操控和电子设备的正常运行。目前RAT系统正向着电液混合式发展,较传统电或液压的形式,其功率有显著的提升^[3]。因此研究冲压空气涡轮设备,对我国多电飞机的发展具有重要的意义。

冲压空气涡轮发动机具有经济性好,重复使用率高等优点^[4]。相较于涡轮喷气发动机,RAT结构简单、质量轻,更适合高速飞行^[5]。近年来,国际上对冲压空气涡轮的研究与日俱增。Wang等^[6]采用CFD数值仿真的方法研究了涡轮叶片对RAT性能的影响。Choi等^[7]研究了风力涡轮机之间的分离距离对风力机输出功率的影响。Minato^[8]探讨了乙醇作为冲压空气涡轮发动机燃料的可行性。Rodríguez-Miranda等^[9]通过对热力循环理论的研究,首次对空气涡轮膨胀机的性能进行了评价。Fernández-Villacé等^[10]建立了一个综合的数值模型来研究空气涡轮火箭发动机在超声速加速过程中的性能,对优化空气涡轮发动机有着很大帮助。

目前国内外大多数是对RAT的气动性能进行仿真计算和理论研究^[11-14],或对RAT功能系统选型与设计的研究^[15-16],而对于RAT的释放过程研究较少。姬芬竹等^[17]根据实际功率需求,依据叶素-动量理论设计了RAT叶片,并采用CFD方法模拟了RAT在特定工况下的全三维混合流场,分析了RAT叶片上流速和流体压力的分布特点。吴佳^[18]对某型冲压空气涡轮进行了总体结构分析,并结合有限元计算对关键零件进行了静强度校核,基于零件的静应力水平结合S-N曲线法和莫罗公式法进行了疲劳寿命校核。姚鹏^[19]针对某型冲压空气涡轮,进行了基于LMS VirtualLab.Motion的多刚体动力学仿真,获得了结构的动力学响应,然后基于有限元软件进行了部件的柔性化分析,得到了关键部件的应力响应,为RAT结构强度校核提供了很好的思路。

RAT在飞机上的释放具有迅速性、冲击载荷大和气动影响明显等特性,对RAT装置的结构强度提出了很高的要求^[20]。因此,为指导后续动力学的仿真和试验,确保结构的安全,有必要对RAT释放过程进行运动学分析。

1 RAT系统概述及其简化

RAT系统作为飞机上的应急能源,在紧急状

态时提供必要的电能,保证机载设备和电传操控的正常运行。工作时系统从飞机内部展开,涡轮受风载的作用产生转动,带动发电机工作。

RAT系统主要由液压作动筒、耳轴、支撑臂、前接杆、泵壳体、涡轮等组成(图1)。系统释放时,液压作动筒伸长,通过前接杆推动支撑臂绕耳轴转动,耳轴通过安装座固定在机身上,与支撑臂相连的液压泵和涡轮逐渐展开,整个释放过程用时较短。随着机身上舱门的打开,系统很快完成释放动作,涡轮即刻进入工作状态。推动涡轮转动的主要是风载,因此影响系统功率的外部因素主要是风载的大小,同时过大的风载也对系统的结构强度提出了更高的要求。

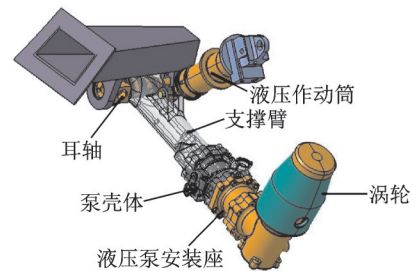


图1 RAT示意图

Fig.1 RAT schematic diagram

液压作动筒的释放过程类似于一种活塞运动,可以简化为移动副;液压作动筒和支撑臂的上端点固支,可以简化为转动副;支撑臂可以绕着作动筒在平面内转动,因此,支撑臂和作动筒的交点可以简化为转动副;支撑臂和上连杆的交点以及上连杆和舱门的交点均可以在3个方向上运动,这两个交点可以简化为球铰副。此外,舱门绕着舱门转轴转动,在舱门转轴处也存在一个转动副。

RAT系统简化如图2所示,连杆 AC_0 是液压作动筒,连杆 BH 是支撑臂, D_1E_0 是舱门连杆, FG 是舱门转轴。铰 A 是作动筒转动轴轴心,铰 B 是支撑臂与耳轴的交点,这两个固定铰在RAT系统释放过程中空间位置保持不变;铰 C_0 是作动筒与支撑臂的交点;支撑臂和舱门连杆的交点 D_1 是一球铰; E_0 是舱门连杆与舱门的交点,随着舱门在空间内运动。

进一步分别建立3个坐标系:整体坐标系 $OXYZ$;以转动铰 B 为原点,建立以转动铰 A 、转动铰 B 和支持臂端点 H 组成的局部平面坐标系 $BX'Y'Z'$;以垂直于支撑臂中轴线的方向为 X'' 轴,沿支撑臂中轴线为 Y'' 轴,建立局部坐标系

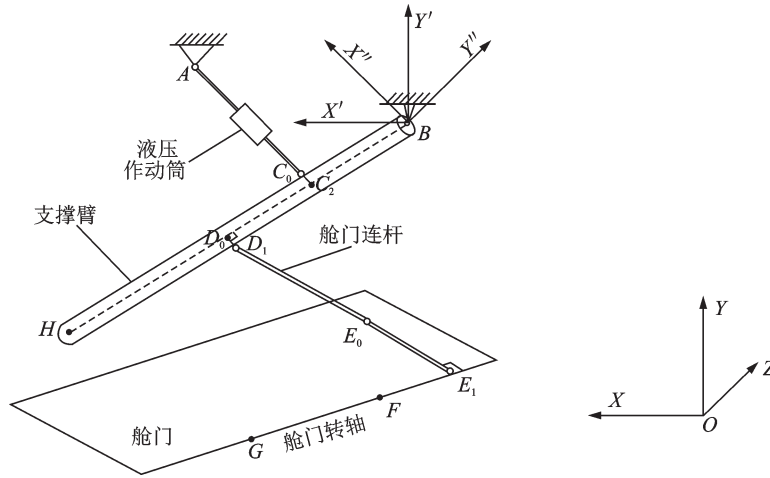


图 2 RAT 简化示意图

Fig.2 RAT simplified diagram

$BX''Y''Z''$ 。作动筒 AC_0 的延长线与支撑臂 BH 中轴线的交点为 C_2 , 过 D_1 作支撑臂 BH 中轴线的垂线, 垂足为 D_0 , 过球铰 E_0 作 FG 的垂线, 垂足为 E_1 。

2 理论计算

以转动铰 B 为原点, 转动铰 A 、转动铰 B 、球铰 E_0 、舱门转轴上点 F 和点 G 等在整体坐标系 $OXYZ$ 中的初始坐标如表 1 所示。

表 1 RAT 系统运动学理论建模中关键节点初始坐标
Table 1 Initial coordinates of key nodes in theoretical modeling of RAT system kinematics

坐标	X/	Y/	Z/
	mm	mm	mm
作动筒转动轴轴心铰 A	13 260	-913	1 928
耳轴与支撑臂的交点铰 B	13 719	-1 260	1 952
作动筒与支撑臂的交点铰 C_0	13 578	-1 210	1 945
作动筒的延长线与支撑臂中轴线的交点 C_1	13 643	-1 271	1 948
上连杆与支撑臂的交点铰 D_1	13 405	-1 308	1 981
D_1 在支撑臂中轴线上的垂足 D_0	13 408	-1 308	1 936
舱门连杆与舱门的交点铰 E_0	13 625	-1 474	1 931
舱门转轴上的投影铰 E_1	13 625	-1 374	2 148
舱门转轴上的点 F	13 604	-1 374	2 148
舱门转轴上的点 G	13 104	-1 374	2 148
支撑臂末端点 H	13 017	-1 368	1 915

作动筒初始长度为 AC_0 , 作动筒伸长量随时间变化的函数为 dL ; 上连杆的长度为 D_1E_0 ; 支撑臂总长为 BH , 则支撑臂端点 H 在局部坐标系 $BX''Y''Z''$ 中的坐标为 $(0, -BH, 0)$; 支撑臂上 BC_2 段长度为 BC_2 ; 支撑臂上 BD_0 段长度为 BD_0 ; 点 C_2 所在支撑臂

横截面半径为 R_1 , 则点 C_0 在局部坐标系 $BX''Y''Z''$ 中的坐标为 $(R_1 \cos \theta_1, -BC_2, R_1 \sin \theta_1)$, 其中 θ_1 是点 C_0 在 $BX''Z''$ 平面上的投影与 BX'' 轴的夹角; 点 D_0 所在支撑臂横截面半径为 R_2 , 则点 D_1 在局部坐标系 $BX''Y''Z''$ 中的坐标为 $(R_2 \cos \theta_2, -BD_0, R_2 \sin \theta_2)$, 其中 θ_2 是点 D_1 在 $BX''Z''$ 平面上的投影与 BX'' 轴的夹角; 平面 ABH 与垂直面 BXY 的夹角为 ψ (即 OXY 面绕 X 轴旋转 ψ 后得到面 ABH)。

2.1 作动筒伸长率

液压作动筒 AC_0 在释放的过程中, 除连杆 AC_0 的长度会随时间变化外, RAT 系统其他连杆的长度均保持不变, 根据试验数据, 液压作动筒伸长变化如图 3 所示。在 $0 \sim 0.7$ s 内, 作动筒伸长量随着时间的增加而增加, 趋于线性变化。在 0.7 s 后, 作动筒的伸长量不再随时间而变化。

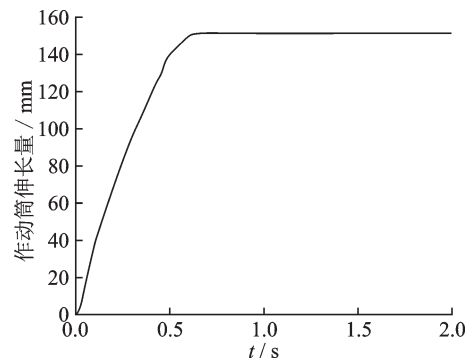


图 3 液压作动筒伸长量随时间变化

Fig.3 Hydraulic actuator elongation changing with time

2.2 支撑臂倾斜角 φ 变化率

如图 2 所示, 坐标系 $BX'Y'Z'$ 是坐标系 $OXYZ$ 绕 X 轴旋转 ψ 后得到, 则坐标系 $BX'Y'Z'$ 到坐标系 $OXYZ$ 的旋转矩阵为

$$T_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\psi & -\sin\psi \\ 0 & \sin\psi & \cos\psi \end{bmatrix} \quad (1)$$

此外,在直角 $\triangle BC_0C_2$ 中,存在 $BC_0 = \sqrt{BC_2^2 + R_1^2}$,而 BC_0 与 AB 的夹角 $\varphi_1 = \arctan\left(\frac{R_1}{BC_2}\right)$ 。

在 $\triangle ABC_0$ 中, AB 与 BC_0 的夹角 φ_2 随作动筒 AC_0 的伸长发生变化,由余弦定理得到

$$\varphi_2(t) = \arccos\left(\frac{AB^2 + BC_0^2 - (AC_0 + dL)^2}{2 \cdot AB \cdot BC_0}\right) \quad (2)$$

$$\varphi(t) = \varphi_1 + \varphi_2(t) - \varphi_3 \quad (3)$$

式中: φ_3 为 AB 与水平轴的夹角,可以由 A 、 B 两点的坐标确定。因此,可得到支撑臂倾斜角 φ 随时间的变化率,如图4所示。

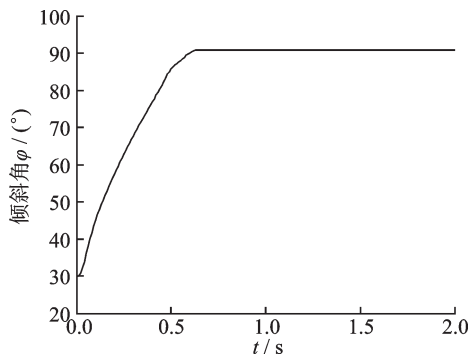


图4 支撑臂倾斜角 φ 随时间的变化曲线图

Fig.4 Change curve of inclination angle φ of support arm with time

由图4可知,支撑臂倾斜角 φ 前期随时间增加而增大,但在0.7 s后不再变化,表明此时RAT释放完成。图5表明支撑臂倾斜角 φ 随作动筒伸长量呈现线性变化。与此同时,在关节铰的带动下,连接在支撑臂上的其他各个部件也发生了相应的位置变换。

2.3 转动铰 C_0 的运动规律

坐标系 $BX''Y''Z''$ 是坐标系 $BX'Y'Z'$ 绕 Z 轴旋转 $\frac{\pi}{2} - \varphi$ 后得到,旋转矩阵为

$$T_2 = \begin{bmatrix} \cos\left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right) & -\sin\left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right) & 0 \\ \sin\left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right) & \cos\left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

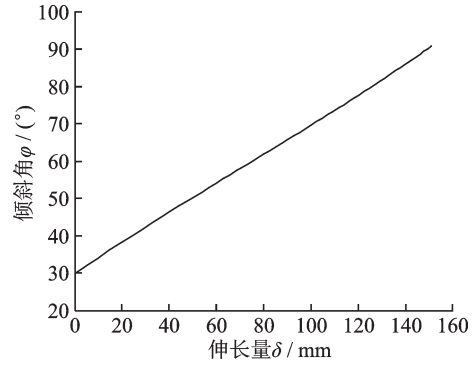


图5 支撑臂倾斜角 φ 随伸长量的变化曲线图

Fig.5 Change curve of inclination angle φ of support arm with elongation

为了得到支撑臂上各个关节铰的运动轨迹,需要先得到连接作动筒和支撑臂之间的转动铰 C_0 的动态变化。 C_0 在整体坐标系下坐标的变化为

$$C_0(t) = T_1 T_2 C_0 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\psi & -\sin\psi \\ 0 & \sin\psi & \cos\psi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right) & -\sin\left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right) & 0 \\ \sin\left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right) & \cos\left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_1 \cos\theta_1 \\ -BC_2 \\ R_1 \sin\theta_1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

其空间运动轨迹、速度随时间变化、加速度随时间变化规律分别如图6—8所示。

由图6—8可知,转动铰 C_0 在0~0.1 s内加速度急速增加,使得转动铰 C_0 在0.1 s时,速度达到最大值。之后,加速度急速下降,经过振荡区后,转动铰 C_0 的速度和加速度都归于零。可见,随着整个释放系统的运作,转动铰 C_0 受到作动筒和支撑臂的相互影响, C_0 的运动状态发生着显著的变化,这也影响着支撑臂上其他关节铰的变化。

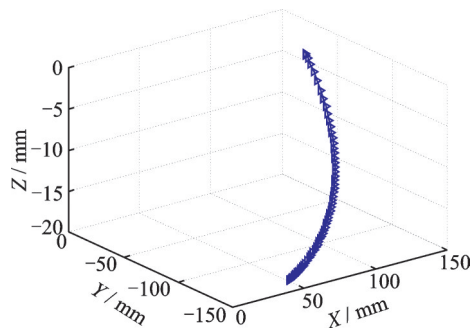


图6 铰 C_0 的空间运动轨迹图

Fig.6 Space motion locus of hinge C_0 .

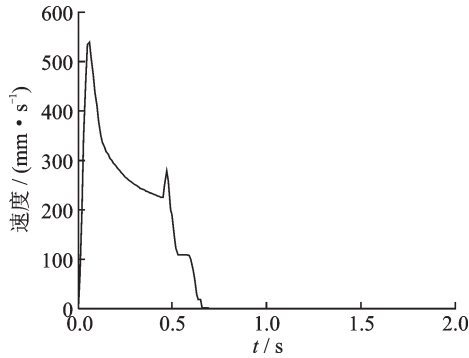


图 7 转动铰 C_0 速度随时间的变化曲线图

Fig.7 Speed curve of rotating hinge C_0 with time

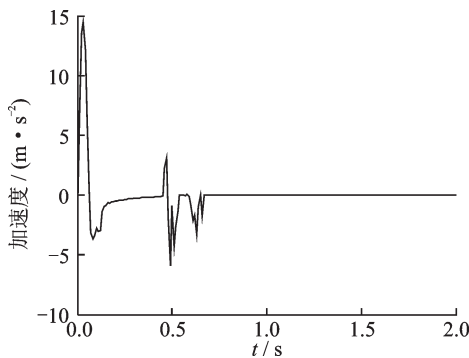


图 8 转动铰 C_0 加速度随时间的变化曲线图

Fig.8 Acceleration curve of rotating hinge C_0 with time

2.4 球铰 D_1 的运动规律

球铰 D_1 是支撑臂和上连杆的交点,也是表征上连杆运动的关键铰接点。根据空间几何位置和部件尺寸,可以得到上连杆上点 D_1 的空间运动轨迹(图 9)。

D_1 在整体坐标系下的位置变化为

$$D_1(t) = T_1 T_2 D_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\psi & -\sin\psi \\ 0 & \sin\psi & \cos\psi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right) & -\sin\left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right) & 0 \\ \sin\left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right) & \cos\left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_2 \cos\theta_1 \\ -BD_0 \\ R_2 \sin\theta_1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

2.5 支撑臂端点 H 的运动规律

冲压空气涡轮系统在释放过程中,舱门也随之打开。为了了解支撑臂与舱门之间是否会发生碰撞,需要知道支撑臂末端的实时空间位置。支撑臂端点 H 在整体坐标系下坐标的变化为

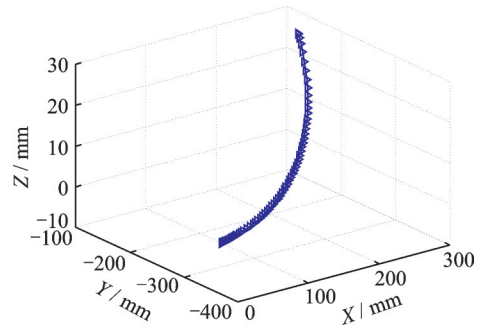


图 9 球铰 D_1 的空间运动轨迹

Fig.9 Spatial trajectory of spherical joint D_1

$$H(t) = T_1 T_2 H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\psi & -\sin\psi \\ 0 & \sin\psi & \cos\psi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right) & -\sin\left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right) & 0 \\ \sin\left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right) & \cos\left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ -BH \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

其空间运动轨迹、速度随时间变化、加速度随时间变化规律分别如图 10—12 所示。

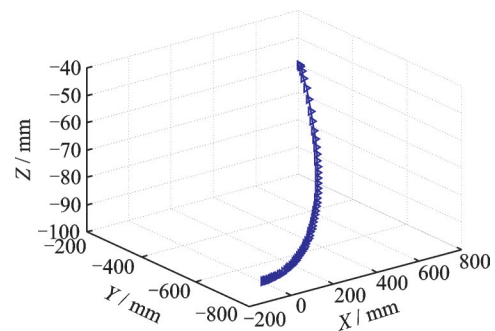


图 10 支撑臂端点 H 的空间运动轨迹

Fig.10 Spatial trajectory of the end H of support arm

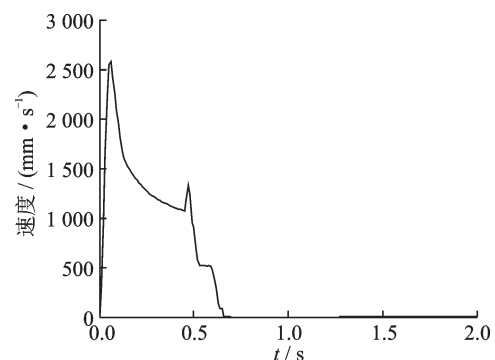


图 11 支撑臂端点 H 的速度曲线图

Fig.11 Speed curve of the end H of support arm

支撑臂端点 H 距离舱门的水平距离为

$$D_{HE_0} = H_y(t) - E_{0y}(t) \quad (8)$$

其随时间变化规律如图 13 所示。

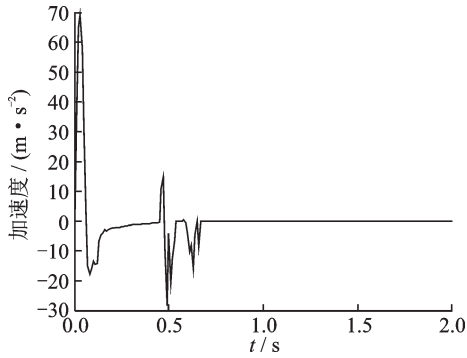


图12 支撑臂端点H的加速度曲线图

Fig.12 Acceleration curve of the end H of support arm

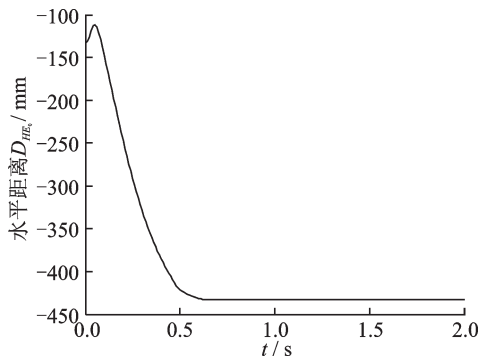


图13 支撑臂端点H距离舱门的水平距离随时间变化

Fig.13 Horizontal distance between the end H of support arm and the hatch changing with time

由图13可知,支撑臂端点H距离舱门的水平距离在起初的时间间隔内稍有增加,之后随时间的增加而线性下降。在0.7 s后,支撑臂端点H距离舱门的水平距离不再随时间而变化。此时,支撑臂端点H距离舱门的水平距离约为-425 mm。由此可见,支撑臂和舱门之间的距离是逐渐增加的,表明RAT在释放过程中的运动是有效的;且在RAT完全释放后,支撑臂端点距舱门的水平距离维持在一个恒定值,表明RAT已完全释放。

2.6 球铰E₀的运动规律

舱门的正常运行也是整个应急释放系统顺利进行的前提和保障,在舱门上能找到一条水平线来表征整个舱门空间运行的全部过程。过球铰E₀作舱门转轴FG的垂线,垂足为E₁。

$$\begin{aligned} E_1F &= kFG \quad (E_1, F, G \text{ 三点共线}) \\ E_0E_1 &\perp FG \end{aligned} \quad (9)$$

由式(9)可以得到E₀在舱门转轴FG上的投影E₁的坐标。

随着作动筒的运动,球铰E₀的位置发生变化。

$$\begin{aligned} (X_{E_0}(t) - X_{E_0})(X_F - X_G) + (Y_{E_0}(t) - Y_{E_0})(Y_F - Y_G) + (Z_{E_0}(t) - Z_{E_0})(Z_F - Z_G) &= 0 \\ \sqrt{(X_{E_0}(t) - X_{E_1})^2 + (Y_{E_0}(t) - Y_{E_1})^2 + (Z_{E_0}(t) - Z_{E_1})^2} &= E_0E_1 \\ \sqrt{(X_{E_0}(t) - X_{D_1}(t))^2 + (Y_{E_0}(t) - Y_{D_1}(t))^2 + (Z_{E_0}(t) - Z_{D_1}(t))^2} &= D_1E_0 \end{aligned} \quad (10)$$

由式(10)可以得到球铰E₀的空间轨迹,速度、加速度随时间的变化(图14—16)。

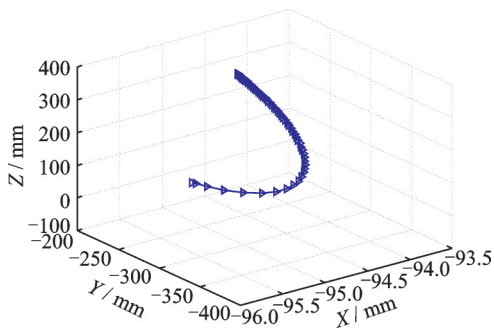


图14 球铰E₀的空间运动轨迹图

Fig.14 Space motion locus of spherical joint E₀

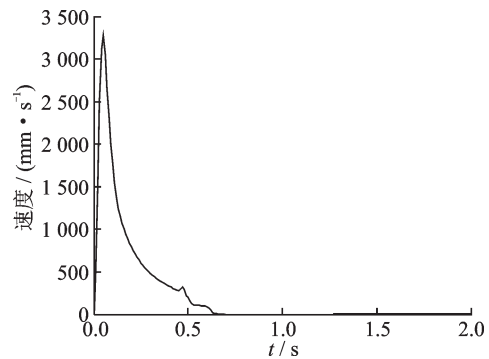


图15 球铰E₀的速度曲线图

Fig.15 Velocity curve of spherical hinge E₀

$$\theta = \arccos \left(\frac{E_0E_1 \cdot E_0E_1(t)}{|E_0E_1| |E_0E_1(t)|} \right) \quad (11)$$

舱门转动过程中转角随时间的变化即E₀E₁与E₀E₁(t)之间的夹角为

其随时间变化规律如图17所示。

由图17可知,舱门转角在0~0.7 s内随时间增

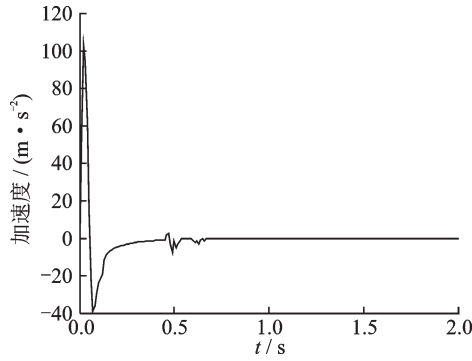
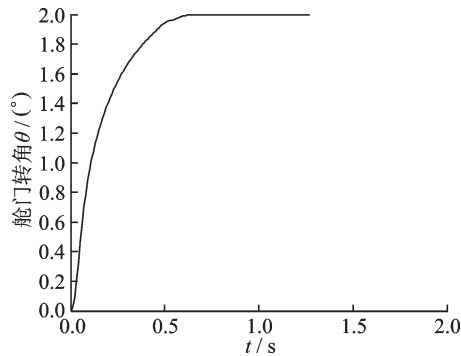
图16 球铰 E_0 的加速度曲线图Fig.16 Acceleration curve of spherical joint E_0 

图17 舱门转角随时间变化曲线图

Fig.17 Curve of hatch angle changing with time

加而增大,且呈现非线性,在0.7 s后,舱门转角不再随时间变化。

3 结 论

本文将RAT系统连接部件简化为运动副,基于机械运动理论,给出了RAT系统释放过程中各个关节的空间位置理论求解方法,并得到了各运动副速度和加速度随时间变化的轨迹曲线。结果表明,RAT系统的释放用时在1 s以内,释放速度较快,各关节在系统释放伊始速度、加速度响应变化较为迅速,其中舱门转轴的加速度峰值最大,后续仿真和试验中应重点对此处进行强度校核。此外,本文建立模型时采用了刚体假设,未考虑约束处的弹性变形,在实际工程应用时需要考虑弹性约束以确保释放可行。本文工作可为后期不同RAT系统构型的初步设计和RAT系统释放的仿真计算、试验提供理论指导。

参考文献:

[1] JEAN-CHARLES M, JIAN F U. Review on signal-by-wire and power-by-wire actuation for more electric aircraft[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2017, 30

(3): 857-870.

- [2] ZOLIDIS M J. Emergency airplane RATs [R]. [S. l.]: Hamilton Sundstrand, 2006.
- [3] SWEARINGEN P, MARKS S J. Automatic ram air turbine deployment: US Patent 8892265 [P]. 2014-11-18.
- [4] FRY R S. A century of ramjet propulsion technology evolution[J]. Journal of Propulsion and Power, 2004, 20(1): 27-58.
- [5] KOBAYASHI H, SUZUKI H. Optimal design of hypersonic turbojet engines for two-stage-to-orbit spaceplane[J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 2008, 45(4): 741-749.
- [6] WANG J, LU Y L, ZHAI X T. Research on ram air turbine blade properties[J]. Applied Mechanics and Materials, 2015, 779: 117-124.
- [7] CHOI N J, NAM S H, JEONG J H, et al. Numerical study on the horizontal axis turbines arrangement in a wind farm: Effect of separation distance on the turbine aerodynamic power output[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2013, 117: 11-17.
- [8] MINATO R. Advantage of ethanol fuel for gas generator cycle air turbo ramjet engine[J]. Aerospace Science and Technology, 2016, 50: 161-172.
- [9] RODRÍGUEZ-MIRANDA I, FERNÁNDEZ-VILLACÉ V, PANIAGUA G. Modeling, analysis, and optimization of the air-turbo-rocket expander engine[J]. Journal of Propulsion and Power, 2013, 29(6): 1266-1273.
- [10] FERNÁNDEZ-VILLACÉ V, PANIAGUA G, STEELANT J. Installed performance evaluation of an air turbo-rocket expander engine[J]. Aerospace Science and Technology, 2014, 35: 63-79.
- [11] TORELLA G. The development of a virtual test bed for gas turbine engines [C]//Proceedings of the 39th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit. [S.l.]: [s.n.], 2003.
- [12] 郭涛. 冲压空气涡轮性能研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2007.
GUO Tao. Study on performance of ram air turbine [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2007.
- [13] 张冬雨, 杨斐, 翟笑天, 等. 冲压空气涡轮气动性能快速算法研究[J]. 江苏航空, 2016(1): 4-6.
ZHANG Dongyu, YANG Fei, ZAI Xiaotian, et al. Research on fast algorithm of pneumatic performance

- of ram air turbine[J]. *Jiangsu Aviation*, 2016(1): 4-6.
- [14] 汪涛, 楚武利, 卢家玲, 等. 亚音速涵道式冲压空气涡轮性能数值仿真[J]. *计算机仿真*, 2009, 26(10): 34-38.
- WANG Tao, CHU Wuli, LU Jialing, et al. Numerical simulation of performance of subsonic ducted ram air turbine[J]. *Computer Simulation*, 2009, 26(10): 34-38.
- [15] 李爰先. 客机冲压空气涡轮系统选型研究[J]. *科技信息*, 2013(14): 399-400.
- LI Aixian. Research on selection of passenger aircraft ram air turbine system[J]. *Science Technology Information*, 2013(14): 399-400.
- [16] 叶伟, 徐万武, 陈健, 等. 冲压空气涡轮泵供应系统方案设计及其特性分析[J]. *火箭推进*, 2015, 41(6): 11-15.
- YE Wei, XU Wanwu, CHEN Jian, et al. Design and performance analysis on fuel feeding system for ram air turbo-pump[J]. *Journal of Rocket Propulsion*, 2015, 41(6): 11-15.
- [17] 姬芬竹, 张梦杰, 王瑞, 等. 冲压空气涡轮叶片设计和气动性能数值模拟[J]. *北京航空航天大学学报*, 2018, 44(7): 1387-1394.
- JI Fenzhu, ZHANG Mengjie, WANG Rui, et al. Blade design and aerodynamic performance numerical simulation on ram air turbine[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2018, 44(7): 1387-1394.
- [18] 吴佳. 某冲压空气涡轮结构设计及强度寿命振动分析[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2008.
- WU Jia. Research on structure design and strength fatigue life vibration analysis of a typical ram air turbine [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2008.
- [19] 姚鹏. 冲压空气涡轮动力装置应急释放动力学分析研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.
- YAO Peng. Dynamic analysis of emergency release of ram air turbine power plant[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018.
- [20] 夏天翔, 卢岳良, 柯兵. 飞机冲压空气涡轮系统的动态特性分析[J]. *航空学报*, 2020, 41(3): 423242-423252.
- XIA Tianxiang, LU Yueliang, KE Bing. Analysis of dynamic behavior of aircraft ram air turbine system[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2020, 41(3): 423242-424352.

(编辑: 夏道家)