

文章编号: 1000-8055(2010)02-0466-05

航空燃油柱塞泵运动学参数计算的坐标法

陈永琴¹, 苏三买², 常博博²

(1. 西安电子科技大学 机电工程学院, 西安 710071;

2. 西北工业大学 动力与能源学院, 西安 710072)

摘 要: 采用坐标法推导并给出了球面斜盘型柱塞泵位移、速度、加速度等运动学参数计算的一种新方法, 并以某型号泵为应用对象, 分别采用现有方法和所推出的坐标法进行仿真, 结果表明: 现有方法由于采用线性化处理, 计算的位移和速度误差在 0.4% 以下、加速度最大误差为 3.34%; 与现有计算方法相比, 坐标法从理论上保证了是一种精确的计算方法, 且计算过程简单, 可为该类柱塞泵运动学参数计算提供理论依据。

关 键 词: 轴向式柱塞泵; 球面斜盘; 斜柱塞; 运动学参数; 航空发动机燃油系统

中图分类号: V233.2

文献标识码: A

Coordinates calculation method for kinematics parameter of aero-engine fuel piston pump

CHEN Yong qin¹, SU San mai², CHANG Bo bo²

(1. School of Electronic Mechanical Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China;

2. School of Power and Energy, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: A set of new formula to calculate spherical swashplate axial piston pump kinematics parameters, such as: displacement, velocity and acceleration, was deduced from coordinates method. The analysis method and deduction procedure ensure the preciseness of the formula in theory. Applying above new formula and current calculation method to the same aero-engine fuel piston pump, the results show that owing to the use of linearization, the currently calculated displacement and velocity errors are less than 0.4 percent, but the maximum acceleration error reaches 3.34 percent. Compared with current calculation method, the new formula is precise and simple, providing a theoretical basis for calculation of kinematics parameters of this type of piston pump.

Key words: axial piston pump; spherical swashplate; inclined piston; kinematics parameter; aero-engine fuel system

航空发动机液压机械控制系统为实现高压、大流量、结构紧凑, 通常采用球面斜盘、带滑靴的倾斜柱塞式轴向柱塞泵^[1-8] (结构示意图如图 1(a)) 作为供油元件。泵的性能与可靠性直接影响整个控制系统的工作情况。

柱塞泵工作时, 柱塞一方面随转子旋转, 另一方面又相对转子沿柱塞腔作直线往复运动, 转子、

柱塞、滑靴和斜盘的受力状况; 滑靴油膜动态平衡; 滑靴运动轨迹等均与柱塞的运动学参数(位移、速度、加速度)密切相关。柱塞运动学参数计算的准确性直接决定其他参数计算的可信度^[2], 从而影响整个泵的设计质量。因此在柱塞泵设计过程中, 准确计算柱塞运动学参数尤为重要。

在航空柱塞泵设计中, 柱塞泵的运动学主要

收稿日期: 2009-03-05; 修订日期: 2009-09-11

基金项目: 航空推进技术验证计划(APTD09-03-04)

作者简介: 陈永琴(1971-), 女, 陕西石泉人, 讲师, 在职博士, 主要从事机械系统结构设计与仿真。

是柱塞的运动^[3], 柱塞的运动学参数通常视作泵的运动学参数^[1-5]. 柱塞运动学参数的计算, 对于直轴式柱塞泵, 计算理论成熟, 文献较多^[9-10]; 但对于航空斜轴式柱塞泵, 目前相关设计手册与行业标准等权威资料^[2-4] 都采用文献[1]的结论, 给出了具体计算公式. 该算法^[1] 中, 柱塞位移计算公式是根据泵运动过程各特征点的三角关系推导而来, 其中对公式中的开方项进行了线性化(泰勒展开取前两项)处理, 并以此进一步推导出速度与加速度的计算公式. 从理论上讲, 该计算方法^[1-5] (以下称为现有算法) 是一种近似算法.

基于上述两个方面的背景分析, 本文采用坐标法推导并给出柱塞运动学参数计算的一种新方法, 并对两种算法的计算精度进行对比分析.

1 燃油柱塞泵运动分析坐标系

航空燃油柱塞泵结构与几何关系示意图如图 1 所示. 参考文献[3], 建立运动学分析坐标系.

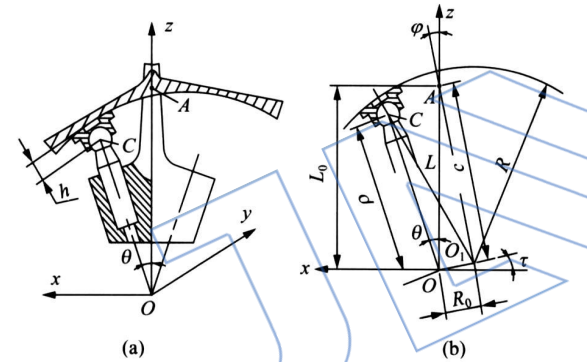


图 1 柱塞泵结构与几何关系图

Fig. 1 Scheme and geometry of piston pump

设通过柱塞轴线和转子轴线的平面为柱塞平面 W ; 柱塞处在下死点位置时的柱塞平面为起始平面(图 1(a)); 沿转子转动方向任意位置的柱塞平面与起始面间的夹角 α 为转子转角.

由上述规定, 柱塞处在下死点(柱塞腔开始吸油的点)时转子转角 α 为计算起点, 即 $\alpha = 0^\circ$; 柱塞处在上死点时转子转角 $\alpha = 180^\circ$. 转子转一圈, α 从 0° 到 360° .

柱塞的运动为空间运动, 为便于运动分析, 选定空间直角参考坐标系如下:

原点, 柱塞轴线与转子轴线的交点, O 点; z 轴, 转子轴线, 指向斜盘方向为正; x 轴, 在起始平面上, 过原点 O 垂直 z 轴, 朝向下死点一侧为正; y 轴, 过原点 O 垂直于 z 轴和 x 轴, 朝吸油一侧为正.

为便于运动分析, 在某一斜盘角 φ 下, 设柱塞泵主要几何参数如图 1(b) 所示.

图中 L_0 为柱塞锥顶点 O 至斜盘转轴轴线 A 的距离, 即 $L_0 = \overline{OA}$; R 为斜盘球形工作面半径; c 为斜盘球形中心 O_1 至斜盘旋转轴线 A 的距离, 即 $c = \overline{O_1A}$; R_0 为斜盘球形中心 O_1 至柱塞锥顶点 O 的距离, 即 $R_0 = \overline{OO_1}$; R_0 始终位于 xOy 平面; h 为 C 点至滑靴上表面的距离; ρ 为柱塞锥顶点 O 至柱塞球头中心 C 的距离 $\rho = \overline{OC}$, 即柱塞以 O 为基点的位移; τ 为 R_0 与负 x 轴的夹角; 在 xOy 平面上角度为正; L 为斜盘球形中心 O_1 至柱塞球头 C 的距离, 即 $L = \overline{O_1C}$; 由几何关系: $L = R - h$.

上述参数中, 当柱塞泵结构一定, L_0, R, c, h, L, θ 为定值; R_0, ρ, τ 随转子转角 α 和斜盘倾角 φ 变化而变化.

为便于后续计算与比较, 下面先简要列出现有算法的计算过程, 然后在相同的坐标系下, 进行本文提出的基于坐标法的柱塞泵运动学参数计算方法推导.

2 运动学参数现有计算方法

柱塞的位移是指在某一斜盘倾角 φ 时, 柱塞在任意转子转角 α 下, 相对于起始位置($\alpha = 0^\circ$)沿柱塞腔移动的距离^[5].

柱塞相对于转子沿柱塞腔轴线作往复直线运动时, 以柱塞球头中心 C 点的运动为代表, 对应于一定的 φ 角, 当柱塞平面 W 处于不同 α 角时, 柱塞有不同的位置, C 点到原点的距离 ρ 的大小亦不同. 所以柱塞的位置可用 ρ 值的大小表示. 求出 ρ 随 α 的变化关系, 便可求出在不同 α 角时柱塞的位移.

给定柱塞泵参数: L_0, c, θ, L .

以 O 为基点, 柱塞球头 C 的位移 ρ 为

$$\rho = L \left(D + E \cdot \cos \alpha + \frac{1}{4} F \cdot \cos 2\alpha \right) \tag{1}$$

其中

$$\begin{cases} D = 1 + M - \frac{1}{2} \lambda^2 \left(1 - A^2 - \frac{1}{2} B^2 \right) \\ E = \lambda B (1 + M) \\ F = \lambda^2 B^2 \\ \lambda = R_0 / L \\ A = \cos \theta \cdot \sin \tau \\ B = -\cos \tau \cdot \sin \theta \end{cases}$$

其中 R_0 和 τ 可由图 1 中的几何关系确定, 由三角形余弦定理

$$R_0 = \sqrt{L_0^2 + c^2 - 2L_0c \cdot \cos \varphi} \quad (2)$$

将 L_0, c 组成的三角形以 L_0 为直角边, 把 L_0 延长, 得 τ 角的正切为

$$\tan \tau = \frac{L_0 - c \cdot \cos \varphi}{c \cdot \sin \varphi} = \frac{1}{\sin \varphi} \left(\frac{L_0}{c} - \cos \varphi \right) \quad (3)$$

将上述参数代入式(1), 便可求出任一 α 角下柱塞位移 ρ .

柱塞在任意 α 下的速度 v 与加速度 a 为

$$v = \frac{d\rho}{dt} = -L\omega \left[E \cdot \sin \alpha + \frac{1}{2} F \cdot \sin 2\alpha \right] \quad (4)$$

$$a = \frac{dv}{dt} = -L\omega^2 \left[E \cdot \cos \alpha + F \cdot \cos 2\alpha \right] \quad (5)$$

其中 ω 为转子角速度, $\omega = \frac{2\pi \cdot n}{60}$

3 基于坐标法的新计算方法

3.1 柱塞球头中心 C 点坐标

根据图1柱塞运动几何关系, 柱塞球头中心 C 点既在以 O_1 为球心的返回盘球面, 又在以 O 为顶点的转子锥面运动. 在图1所示以 O 为坐标原点的三维坐标系下, 其中以 O 为顶点的锥面方程为

$$x^2 + y^2 = z^2 \cdot \tan^2 \theta \quad (6)$$

式中 (x, y, z) 为锥面上任意一点的坐标, θ 为圆锥角.

以 O 为坐标原定, O_1 为球心的球面方程为

$$(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2 = L^2 \quad (7)$$

式中 (x, y, z) 为以 O_1 为球心, C 点移动轨迹球面上任意一点的坐标, (x_0, y_0, z_0) 为球心 O_1 的坐标, L 为 C 点移动轨迹球面半径.

由图1几何关系可导出, 斜盘球面中心 O_1 点的坐标为 $(-c \cdot \sin \varphi, 0, -(c \cdot \cos \varphi - L_0))$, 相应式(7)球面方程为

$$(x + c \cdot \sin \varphi)^2 + y^2 + (z + c \cdot \cos \varphi - L_0)^2 = (R - h)^2 \quad (8)$$

联立方程(6)与方程(8), 列写 C 点坐标关于柱塞转角 α 的参数方程

由锥面方程, 在柱塞转角为 α 时, 锥面上 C 点坐标 (x, y, z) 可列写为

$$\begin{cases} x = z \cdot \tan \theta \cdot \cos \alpha \\ y = z \cdot \tan \theta \cdot \sin \alpha \\ z = z \end{cases} \quad (9)$$

将式(9)代入式(8)球面方程, 整理出柱塞球头 C 点坐标 z 关于转角 α 的方程如下:

$$(1 + \tan^2 \theta) z^2 + 2(c \cdot \sin \varphi \cdot \tan \theta \cdot \cos \alpha + c \cdot \cos \varphi - L_0) z + c^2 + L_0^2 - 2L_0c \cdot \cos \varphi - (R - h)^2 = 0 \quad (10)$$

设中间变量

$$\begin{cases} a_1 = 1 + \tan^2 \theta \\ b_1 = 2(c \cdot \sin \varphi \cdot \tan \theta \cdot \cos \alpha + c \cdot \cos \varphi - L_0) \\ c_1 = c^2 + L_0^2 - 2L_0c \cdot \cos \varphi - (R - h)^2 \end{cases} \quad (11)$$

则式(10)转换为如下关于 z 的二次方程

$$a_1 z^2 + b_1 z + c_1 = 0 \quad (12)$$

解方程得

$$\begin{aligned} z = z_1 &= \frac{-b_1 + \sqrt{b_1^2 - 4a_1c_1}}{2a_1} \\ z = z_2 &= \frac{-b_1 - \sqrt{b_1^2 - 4a_1c_1}}{2a_1} \end{aligned}$$

由于 C 点始终在坐标系 z 轴的正半轴方向移动, 上述 $z_2 < 0$ 不符合实际情况, 舍去. 因此将 z_1 代入方程(10)得 C 点随转角 α 变化的坐标

$$\begin{cases} x = \tan \theta \cdot \cos \alpha \cdot \frac{-b_1 + \sqrt{b_1^2 - 4a_1c_1}}{2a_1} \\ y = \tan \theta \cdot \sin \alpha \cdot \frac{-b_1 + \sqrt{b_1^2 - 4a_1c_1}}{2a_1} \\ z = \frac{-b_1 + \sqrt{b_1^2 - 4a_1c_1}}{2a_1} \end{cases} \quad (13)$$

3.2 柱塞运动学参数计算方法

C 点在以 O 点为球心, ρ 为半径的球面上移动, 因此柱塞运动的位移为

$$\rho = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (14)$$

代入式(13)坐标并进行合并简化得

$$\rho = z \cdot \sec \theta = z \cdot \sqrt{1 + \tan^2 \theta} \quad (15)$$

对式(15)求导得柱塞运动的速度为

$$v = \frac{d\rho}{dt} = \frac{d\rho}{d\alpha} \cdot \frac{d\alpha}{dt} \quad (16)$$

$$\text{其中} \quad \frac{d\alpha}{dt} = \frac{2\pi}{60} \cdot n = \omega \quad (17)$$

式(15)对 α 求导并整理, 结合式(17)得

$$\begin{aligned} v &= 2c \cdot \sin \varphi \cdot \tan \theta \cdot \sqrt{1 + \tan^2 \theta} \cdot \\ &\quad z \cdot \sin \alpha \cdot \frac{1}{\sqrt{b_1^2 - 4a_1c_1}} \cdot \omega \end{aligned} \quad (18)$$

式(18)对 α 求导并整理, 结合式(17)得柱塞运动的加速度为

$$a = \frac{d^2 \rho}{dt^2} = \frac{dv}{dt} = \frac{dv}{d\alpha} \cdot \frac{d\alpha}{dt} =$$
$$2\omega^2 c \cdot \sin \varphi \cdot \tan \theta \sqrt{1 + \tan^2 \theta} \cdot$$
$$\left[\frac{z \cdot \cos \alpha}{b_1^2 - 4a_1c_1} + \frac{2zc \cdot \sin \varphi \cdot \tan \theta \cdot \sin^2 \alpha}{b_1^2 - 4a_1c_1} + \right.$$
$$\left. \frac{2z \cdot c \cdot b_1 \sin^2 \alpha \cdot \sin \varphi \cdot \tan \theta}{(b_1^2 - 4a_1c_1)^{1.5}} \right]$$

(19)

4 实例计算与结果对比分析

以某型航空燃油柱塞泵为例, 泵的结构参数为 $L_0=175.017\text{ mm}$, $c=169.44\text{ mm}$, $\theta=14^\circ$, $L=155\text{ mm}$. 分别采用上述两种计算方法, 取泵的极限工作状态(转速 $n=4250\text{ r/min}$, 斜盘倾角 $\varphi=14.5^\circ$)进行仿真. 柱塞在一个旋转周期内位移、速度、加速度曲线如图 2 所示.

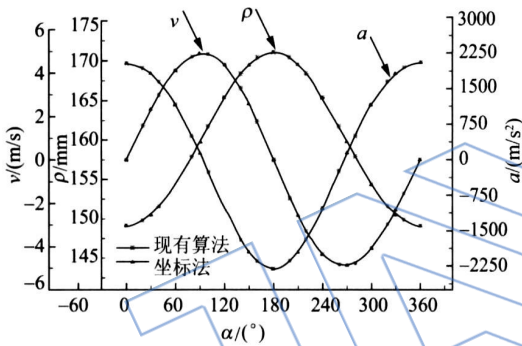


图 2 柱塞运动学参数曲线

Fig.2 Piston kinematics parameter curves

由理论分析和图 2 曲线可知, 柱塞运动的位移、速度、加速度各参数在转子转角 α 为 $0^\circ \sim 180^\circ$ 与 $180^\circ \sim 360^\circ$ 对称, 取 $0^\circ \sim 180^\circ$ 典型工作点计算数据进行分析, 可对比得出两种计算方法的差异. 两种方法所得的计算数据及对比结果如表 1 所示.

由前面推导过程可知, 坐标法在理论上证明了是一种运动学参数计算的准确方法, 而现有算法^[1-5]由于计算过程采用泰勒展开进行线性化处理, 计算结果势必存在误差. 分析表 1 数据, 相比较于坐标法, 现有算法最大位移误差为 0.086%, 最大速度误差为 0.375%, 二者与坐标法吻合的较好, 但在转子转角 α 为 90° (270°) 处, 加速度最大误差达 3.34%. 根据前面两种算法的计算机理, 结合计算数据分析可知, 现有方法加速度在 90° (270°) 附近误差较大, 在其它角度范围较小, 其原因是柱塞位移为角度 α 的非线性函数, 现有方法对位移进行线性化后, 再对 α 求导两次才得到加速度, 求导过程放大了对线性化略去的误差.

加速度是柱塞泵动力学参数(如离心力、惯性力)计算的依据^[2,5]. 分析表 1 中数据, 现有方法计算的加速度虽然相对误差较大, 但绝对误差较小, 且相对误差最大出现在泵整个工作循环加速度绝对值最小的范围, 因此采用现有方法对柱塞泵运动学参数设计影响甚微.

表 1 两种方法对各参数的计算数据及误差对比

Table 1 Original calculating data and error compare of two methods

$\alpha/(^\circ)$	位移 ρ/mm			速度 $v/(m/s)$			加速度 $a/(m/s^2)$		
	现有算法	坐标法	误差/%	现有算法	坐标法	误差/%	现有算法	坐标法	误差/%
0	149.19079	149.06183	0.08652	0	0	0	2037.9917	2038.20627	-0.01053
30	150.57534	150.44678	0.08545	2.30984	2.31094	-0.0476	1814.22412	1816.49670	-0.12511
60	154.42017	154.29533	0.08091	4.09663	4.10252	-0.14357	1153.6082	1159.19779	-0.48219
90	159.81945	159.70554	0.07133	4.88161	4.89412	-0.25561	134.61236	139.264686	-3.34064
120	165.38863	165.29146	0.05879	4.35857	4.37335	-0.33796	-1018.9959	-1020.2543	-0.12335
150	169.57326	169.49115	0.04845	2.57177	2.58146	-0.37537	-1948.8365	-1955.7607	-0.35405
180	171.1277	171.05151	0.04454	0	0	0	-2307.2164	-2316.0944	-0.38332

5 结 论

运动学参数计算的准确性直接影响燃油柱塞

泵设计计算数据, 从而影响泵的设计指标. 现有方法由于计算过程采用线性化处理, 使得计算结果存在误差. 本文基于坐标方法, 详细推导并给出—

组运动学参数新的计算公式,从理论上保证了算法的准确性.实际算例对比说明,现有计算方法对于位移与速度计算误差较小,加速度在局部范围相对误差较大,但绝对误差较小,对泵的动力学计算影响较小.两种计算方法都可以用于工程设计,其中本文所推导的坐标法既为评价现有算法的准确性提供了依据,也为该类型航空燃油柱塞泵运动学分析提供了一种新的计算方法.

参考文献:

[1] 希乌科夫 А Г. 燃气涡轮发动机的燃料泵和喷嘴[M]. 北京: 国防工业出版社, 1960.

[2] 中华人民共和国航空航天工业部. HB/Z 151-1989 航空发动机燃油与控制系统柱塞式燃油泵设计指南[S]. 北京: 中华人民共和国航空航天工业部, 1989

[3] 航空发动机设计手册编委会. 航空发动机设计手册(15 册: 控制及燃油系统)[M]. 北京: 航空工业出版社, 2002

[4] 航空喷气发动机自动控制设计手册编写组. 航空喷气发

动机自动控制设计手册[M]. 北京: 国防工业出版社, 1984

[5] 曾俊英. 航空动力装置控制(元件部分)[M]. 北京: 航空工业出版社, 1995

[6] 史培林, 张婷, 高懿. 柱塞泵保持架滑靴安装孔的设计及尺寸计算[J]. 航空动力学报, 2007, 22(12) : 2124-2133.

SHI Peilin, ZHANG Ting, GAO Yi. Design and dimensional calculation of mounting holes of slipping shoe in piston pump[J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22 (12) : 2124-2133. (in Chinese)

[7] 雷勇. 航空高压高速液压柱塞泵的设计研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2006.

[8] 吴琪华, 贺惠珠, 张加帧. 航空发动机调节[M]. 北京: 国防工业出版社, 1986

[9] Li Z. Condition monitoring of axial piston pump[D]. Canada: University of Saskatchewan, 2005.

[10] 李玉琳. 液压元件与系统设计[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1991

[11] 蒲志理. 航空油泵设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 1983