

高速凸轮摆杆机构参数化设计技术研究

蔡小尧^{1,2}, 车文刚¹, 陈文兵¹

(1. 昆明理工大学信息工程与自动化学院, 云南 昆明 650500;
2. 云南烟草机械有限责任公司, 云南 昆明 650106)

摘 要: 针对高速凸轮摆杆机构参数化设计过程中从动件摆动引起的凸轮转角偏移问题, 分析了凸轮转角偏移产生的原因及影响, 提出了基于转角补偿量的参数化设计数学模型, 实现了凸轮参数到凸轮轮廓曲线的精确映射。以改进正弦运动规律为例, 基于UG软件和二次开发平台实现了凸轮摆杆机构参数化设计和特征曲线可视化, 并通过UG运动仿真验证了数学模型和特征曲线的准确性。研究结果表明: 推程和回程运动阶段凸轮轮廓曲线对应的圆心角对比凸轮转角都发生了不同程度的偏移; 基于转角补偿量的数学模型可以降低凸轮从动件的最大加速度, 实现凸轮轮廓曲线的精确设计, 同时简化了凸轮摆杆机构的设计和修改流程, 极大的提高了设计效率。

关 键 词: 参数化设计; 凸轮摆杆机构; 凸轮转角偏移; UG二次开发; NX/Open
中图分类号: TP 391 **DOI:** 10.11996/JGj.2095-302X.2021040664
文献标识码: A **文章编号:** 2095-302X(2021)04-0664-06

Research on parametric design technology of high speed cam mechanism with oscillating follower

CAI Xiao-yao^{1,2}, CHE Wen-gang¹, CHEN Wen-bing¹

(1. School of Information Engineering and Automation, Kunming University of Science and Technology, Kunming Yunnan 650500, China;
2. Yunnan Tobacco Machinery Co. Ltd., Kunming Yunnan 650106, China)

Abstract: Aiming at the problems of cam angle deviation caused by follower swing in the parametric design process of high-speed cam mechanism with oscillating follower, this paper analyzed the causes and effects of cam angle deviation, proposed a mathematical model of parametric design based on angle compensation, and realized the accurate mapping from cam parameters to cam profile curve. Taking the improved sinusoidal motion law as an example, parametric design and characteristic curve visualization of cam mechanism with oscillating follower were realized based on UG software and secondary development platform, and the accuracy of mathematical model and characteristic curve was verified by UG motion simulation. The results show that the center angle of the cam profile curve is different from the cam angle in push and return stages, and that the mathematical model based on the angle compensation can reduce the maximum acceleration of the cam follower, realize the accurate design of the cam profile curve, simplify the design and modification process of the cam swing mechanism, and greatly improve the design efficiency.

Keywords: parametric design; cam mechanism with oscillating follower; cam angle deviation; UG secondary development; NX/Open

收稿日期: 2020-11-29; 定稿日期: 2021-02-19

Received: 29 November, 2020; Finalized: 19 February, 2021

第一作者: 蔡小尧(1991-), 男, 贵州盘县人, 工程师, 硕士研究生。主要研究方向为数字化设计。E-mail: 906822635@qq.com

First author: CAI Xiao-yao (1991-), male, intermediate engineer, master student. His main research interest covers digital design.
E-mail: 906822635@qq.com

通信作者: 车文刚(1963-), 男, 云南丽江人, 教授, 博士。主要研究方向为计算机应用、计算机图形等。E-mail: 2337863489@qq.com

Corresponding author: CHE Wen-gang (1963-), male, professor, Ph.D. His main research interests cover computer application, computer graphics, etc.
E-mail: 2337863489@qq.com

高速凸轮摆杆机构在汽车发动机、包装机、纺织机械等设备中具有广泛应用,由于高速凸轮在运转过程中容易产生振动、噪音及磨损等问题,因此凸轮摆杆机构的设计需要在满足摆杆运动的角速度、角加速度和跃度曲线都连续等约束条件下,尽可能降低角加速度。

由于凸轮机构形式多样,设计计算复杂,目前的机械设计软件均未开发凸轮设计模块。UG(Unigraphics NX)是目前比较通用的三维机械设计软件,具有强大的数字化设计、数字化验证和数字化制造等功能,同时也具有较强的二次开发功能^[1],可以通过二次开发实现功能拓展。文献[2]利用UG二次开发技术及程序调用模型数据,将对话框和模型联系起来,通过对话框输入参数,自动生成或更新麻花钻模型,提高了产品设计和修改效率。智能虚拟装配技术^[3-5]的引入能够根据获取到的三维形体特征自动捕捉设计者意图,减少手动装配造成的多余劳动,减少零件研发时间,降低花费,提高装配效率。

曹澍等^[6]通过NX/Open应用程序开发接口结合VS开发了适用于弧面分度凸轮机构快速建模的参数化设计系统,实现了弧面分度凸轮机构的可视化交互设计,极大地缩短了设计时间和减少了繁琐的重复劳动,证明了参数化设计的优越性和可行性。目前凸轮摆杆机构设计主要采用第三方设计软件或工具设计完成后转成通用文件导入三维机械设计软件中实现凸轮建模,再进行后续的结构设计和运动仿真^[7]。该方法由于涉及到多个软件之间数据格式转换,其过程会产生一定的误差,并且转换格式后的数据无法在产品后期更改,造成产品设计和更改效率低下。参数化设计技术是指根据用户设置的参数和约束条件,对应生成相应的模型和几何形状,当模型参数和约束条件发生变化时,将对几何体模型进行形状重建和更新,将参数化设计引入盘形凸轮摆杆机构设计过程中,有望进一步提高凸轮摆杆机构设计的效率和精度、缩短相关产品的开发周期^[8-9]。

本文以改进正弦运动规律为例,基于UG表达式和UG二次开发实现了高速凸轮摆杆机构的参数化设计,主要有以下4点创新:

(1) 利用凸轮摆杆机构解析法原理,针对高速凸轮摆杆机构参数化设计过程中从动件摆动引起的凸轮转角偏移问题,分析了凸轮转角偏移问题产生的原因及影响。结果表明:推程阶段和回程阶段

凸轮轮廓曲线对应的圆心角对比凸轮转角都发生了不同程度的偏移;

(2) 通过引入转角补偿量,设计了基于转角补偿量的凸轮参数化设计数学模型,运动仿真结果表明,该设计可以降低从动件的最大加速度;

(3) 结合UG规律曲线和NX/Open二次开发,实现了凸轮摆杆机构参数化设计和修改,用户只需通过人机交互界面修改关键参数即可完成修改,方便用户在整个产品开发周期中进行参数的调整;

(4) 利用C#窗体和图表功能与NX/Open结合,实现凸轮摆杆机构的角加速度、角速度以及位移曲线的可视化,方便用户一键生成上述特征曲线,并通过UG运动学仿真模块验证其正确性。

1 参数化设计方法概述

参数化设计是指零件的形状相对固定,模型的几何形状由用户设定的参数和约束来定义。当给定不同的参数序列值和不同的约束条件时,可以驱动新的目标几何体,设计结果就是包含设计信息的模型。参数化为产品模型的可变性、重用性和并行设计提供了一种手段。使用户可以方便地利用已有模型进行重构,在遵循原设计意图的前提下,方便地修改系列产品模型,大大提高了设计效率^[10-11]。

1.1 传统凸轮参数化设计方法

传统凸轮参数化设计方法往往需要多个设计工具或软件之间进行设计数据转换和传递,转换格式后的数据无法在产品后期更改,产品设计发生修改时会产生大量的重复步骤和工作,极大的影响了产品开发设计的效率^[7],传统参数化设计流程如图1所示。

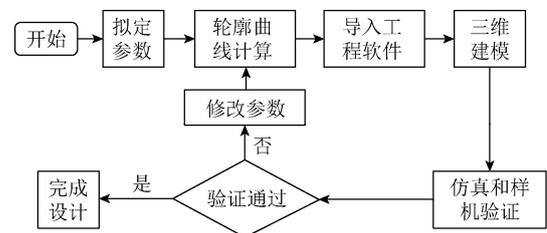


图1 传统凸轮参数化设计流程

Fig. 1 Traditional parametric design process of cam

1.2 基于UG二次开发的凸轮参数化设计方法

在UG软件上进行参数化设计的主要方法有:尺寸驱动法、编程方法和表达式方法等^[6]。由于凸轮轮廓曲线精度要求高、特征复杂,难以用简单的尺寸和约束关系描述,因此本文采用表达式法来实

现凸轮摆杆机构的特征参数到凸轮轮廓曲线的映射, 并利用编程法开发了人机交互设计和修改界面, 实现了凸轮摆杆机构速度和加速度等特征曲线的一键可视化, 为凸轮摆杆机构的设计提供参考。本文基于 UG 二次开发的凸轮参数化设计流程如图 2 所示, 对比传统凸轮参数化设计方法, 基于表达式的参数化设计方法简化了设计修改流程从而提高设计效率。

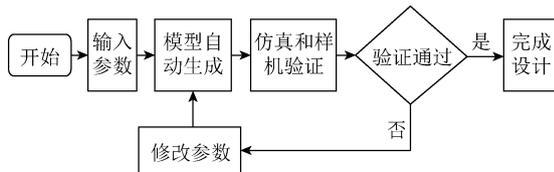


图 2 基于 UG 二次开发的凸轮参数化设计流程

Fig. 2 Parametric design process of cam based on UG secondary development

2 基于转角补偿量的凸轮摆杆机构参数化设计数学模型

本文以改进正弦运动规律为例建立凸轮摆杆机构参数化设计数学模型, 针对摆杆摆动对凸轮转角的影响(即各运动阶段凸轮理论转角与凸轮轮廓曲线对应的角度不相等, 存在一定的偏移量), 提出了基于转角补偿量的凸轮参数化设计数学模型。假定凸轮朝顺时针方向旋转, 推程角大小为 A_1 , 远休止角大小为 A_2 , 回程角大小为 A_3 , 近休止角大小为 A_4 , 基圆半径大小为 R_0 , 凸轮升程为 H , 摆杆长度为 R_G , 滚子半径大小为 R_1 , D_0 为摆杆旋转中心与凸轮旋转中心的距离, 凸轮转速为 $w(\text{r/min})$ 。

图 3 为凸轮摆杆机构示意图, 以改进正弦运动规律中回程第一阶段($0 \leq T_1 \leq 1/8 \times A_3$)为例构建数学模型。点 O 为凸轮旋转中心, 点 O_1 为摆杆旋转中心, 点 P_i 为凸轮转过某角度 T_1 ($0 \leq T_1 \leq 1/8 \times A_3$) 时从动件所在位置。摆杆初始角度 θ_0 、最大角度 θ_{\max} 及摆杆总行程 θ 计算如下

$$\theta_0 = \arccos\left(\frac{D_0^2 + R_G^2 - R_0^2}{2D_0R_G}\right) \quad (1)$$

$$\theta_{\max} = \arccos\left(\frac{D_0^2 + R_G^2 - (R_0 + H)^2}{2D_0R_G}\right) \quad (2)$$

$$\theta = \theta_{\max} - \theta_0 \quad (3)$$

改进正弦运动规律的从动件摆动角度为

$$t_1 = \frac{T_1}{A_3} \quad (4)$$

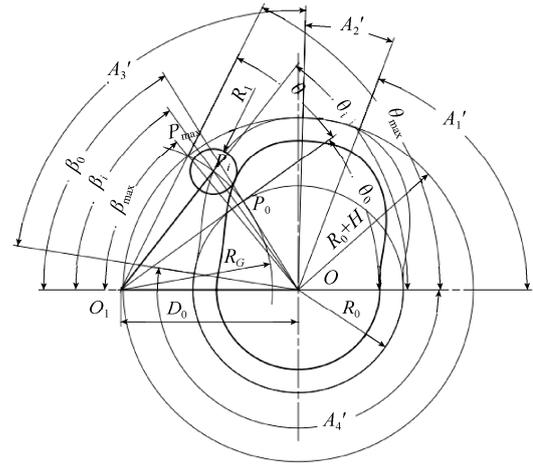


图 3 凸轮摆杆机构参数示意图

Fig. 3 Parameter diagram of cam swing bar mechanism

$$\theta_i = \theta_{\max} - \frac{\pi t_1 - \frac{1}{4} \sin(4\pi t_1)}{4 + \pi} \theta \quad (5)$$

其中, θ_i 为凸轮转过 T_1 角度时从动件的摆动角度。

凸轮转过 T_1 角度时对应的极半径为

$$R_{i1} = \sqrt{D_0^2 + R_G^2 - 2D_0R_G \cos(\theta_i)} \quad (6)$$

图 3 中 A_1' , A_2' , A_3' 和 A_4' 分别为推程阶段、远休止阶段、回程阶段和近休止阶段凸轮轮廓曲线对应的圆心角。其中, β_i 为 OP_i 与 OO_1 的夹角, 凸轮匀速旋转过程中, θ_i 在 θ_0 到 θ_{\max} 范围内变化, β_i 在 β_0 到 β_{\max} 范围内变化, β_i 的变化量 $\delta_{\beta i}$ 为从动件摆动过程中引起的凸轮转角偏移量, 具体计算为

$$\beta_0 = \arccos\left(\frac{D_0^2 + R_0^2 - R_G^2}{2D_0R_0}\right) \quad (7)$$

$$\delta_{\beta i} = \arccos\left(\frac{D_0^2 + R_{i1}^2 - R_G^2}{2D_0R_{i1}}\right) - \beta_0 \quad (8)$$

在后续凸轮轮廓曲线直角坐标求解中, 需将 T_1 减去相应的 $\delta_{\beta i}$ (即转角补偿量) 后才能得到准确的轮廓曲线坐标 X_{i1} 和 Y_{i1} , 如式(9)和式(10)。

$$X_{i1} = R_{i1} \cos(T_1 + A_1 + A_2 - \delta_{\beta i}) \quad (9)$$

$$Y_{i1} = R_{i1} \sin(T_1 + A_1 + A_2 - \delta_{\beta i}) \quad (10)$$

为实现凸轮摆杆机构特征曲线的一键可视化, 需分别计算摆杆摆动角度、角速度和角加速度, 即

$$S_{i1} = \theta_i - \theta_0 \quad (11)$$

$$V_{i1} = -\frac{6\pi w \theta (1 - \cos(4\pi t_1))}{A_3 (4 + \pi)} \quad (12)$$

$$A_{i1} = \frac{-144\pi^2 w^2 \theta \sin(4\pi t_1)}{A_3^2 (4 + \pi)} \quad (13)$$

对于其他区间的计算方法与此类似, 只需根据改进正弦运动规律调整 θ_i 计算公式, 基于上述数学模型

用 UG 表达式生成凸轮轮廓曲线模板, 如图 4 所示。

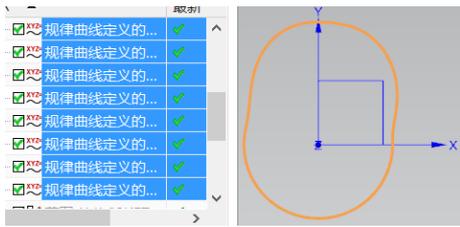


图 4 UG 表达式生成的凸轮轮廓曲线模板
Fig. 4 Cam profile curve template generated by UG expression



图 6 凸轮摆杆机构参数化设计系统菜单工具
Fig. 6 Menu tool of parametric design system for cam swing bar mechanism

3 参数化设计系统应用框架与开发

3.1 UG 二次开发概述

UG 二次开发是指基于 UG 软件平台, 用户针对自身需求, 融合相关的行业经验和知识, 开发面向行业和面向设计过程的应用工具。UG 软件通过内部程序规定了应用程序开发和扩展的方式为动态链接库(dynamic link library, DLL)技术。UG 启动时, 系统自动加载 DLL 文件或通过菜单、工具条启动应用程序和对话框, 由对话框和相应的内部接口函数实现相应的程序调用, 实现应用程序与 UG 平台的无缝集成。

3.2 参数化设计应用程序框架

凸轮摆杆机构参数化设计系统应用程序与框架如图 5 所示, 通过 Menu Script 工具开发的菜单和工具条文件对应的扩展名分别是*.men 和*.tbr, 这些文件放在参数化设计系统目录下的 Startup 子文件夹中, UG 启动时会自动加载该子文件夹下的文件, 凸轮摆杆机构参数化设计系统的菜单工具条如图 6 所示。

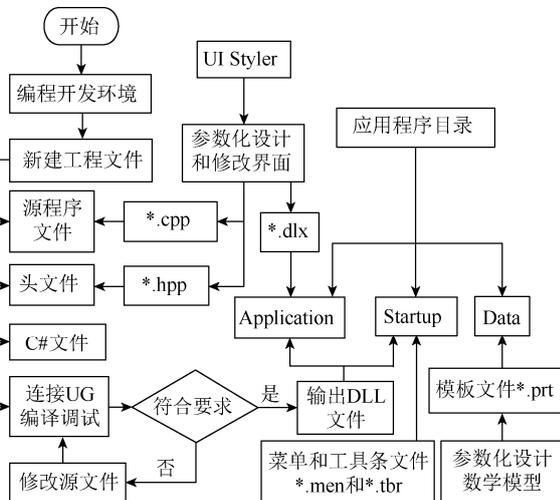


图 5 凸轮摆杆机构参数化设计系统框架

Fig. 5 Framework of parametric design system for cam swing bar mechanism

通过 Block UI Styler 工具开发的对话框工具文件扩展名为*.dlx, 同时会自动生成对话框对应的*.cpp 和*.hpp 文件, 根据应用程序功能对*.cpp 和*.hpp 文件在编程开发环境中进行编辑添加相应的函数和功能, 经编译调试生成对应的 DLL 文件。DLX 和 DLL 这 2 类文件放在参数化设计系统目录下的 Application 子文件夹中, 当应用程序进入这些对话框对应的 DLL 应用程序时, 系统通过相应的菜单工具或操作按钮实现这些特定应用模块相关的文件调用。Data 子目录下存放模板文件(*.prt), 模板文件, 模板文件中存储了根据凸轮摆杆机构参数化数学模型设计的表达式, 供应用程序在创建凸轮模型时调用。

该参数化设计系统中, 创建凸轮模型对应的应用程序为 createModel.dll 和 createModel.dlx, 应用程序通过 UF_PART_import()函数导入模板文件, 通过 UF_ASSEM_ask_work_part()函数获取当前工作零件的 tag, 通过 UF_MODL_ask_exps_of_part()函数获取表达式, 通过 UF_MODL_edit_exp()函数对表达式进行编辑, 从而实现了一键创建凸轮摆杆模型, 创建凸轮模型对话框如图 7 所示。编辑凸轮模型对应的应用程序为 editModel.dll 和 editModel.dlx,



图 7 创建凸轮模型对话框

Fig. 7 Create cam model dialog box

该应用程序通过 `UF_MODL_ask_exps_of_part()` 函数获取表达式, 通过 `UF_MODL_edit_exp()` 函数对表达式进行编辑, 从而实现通过对话框对凸轮摆杆模型进行编辑。

3.3 参数化建模与凸轮转角偏移示例

以图 7 中给定的参数为例, 假定凸轮沿顺时针方向旋转, 生成的凸轮模型如图 8 所示。生成的模型对应的凸轮转角与轮廓曲线角度对比见表 1, 推程阶段和回程阶段凸轮轮廓曲线对应的圆心角对比凸轮转角都发生了不同程度的偏移。

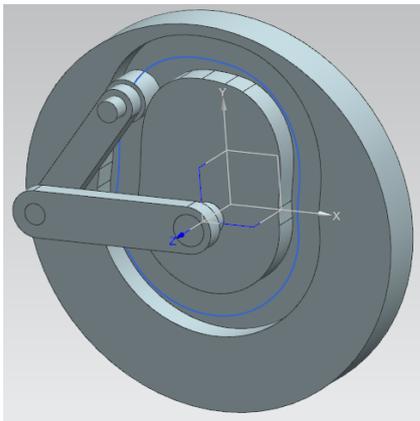


图 8 参数化建模效果

Fig. 8 Parametric modeling results

表 1 凸轮转角与轮廓曲线角度对比(°)
Table 1 Comparison of cam angle and profile curve angle (°)

阶段	凸轮转角	凸轮轮廓曲线角度
推程阶段	$A_1=71.00$	$A_1'=78.49$
远休止阶段	$A_2=10.00$	$A_2'=10.00$
回程阶段	$A_3=90.00$	$A_3'=82.51$
近休止阶段	$A_4=189.00$	$A_4'=189.00$

3.4 凸轮特征曲线可视化

由于 UG 自带的二次开发对话框不具有图表显示功能, 因此本研究通过将 C#窗体与 NX Open 结合实现从动件角加速度、角速度和摆动角度的可视化。特征曲线可视化应用程序以 NX Open C 作为编程接口, 通过在 C#窗体中引用 NX Open, 应用 `NXOpen.Session.GetSession()` 和 `FindObject()` 函数获取当前工作部件的 tag 和表达式。利用获取的模型参数值通过式(11)~(13)分别计算得到从动件角加速度、角速度和摆动角度, 再将计算结果通过 C#窗体的图表功能显示出来。调试后的源程序经编译执行后生成 `plotForCurve.dll`, 该文件存放到 Application 目录下, 供 UG 菜单和工具条调用, 从而实现凸轮摆杆机构的角加速度、角速度以及位移曲线的一键

可视化。以图 7 给定的参数为例, 角加速度可视化效果如图 9 所示。

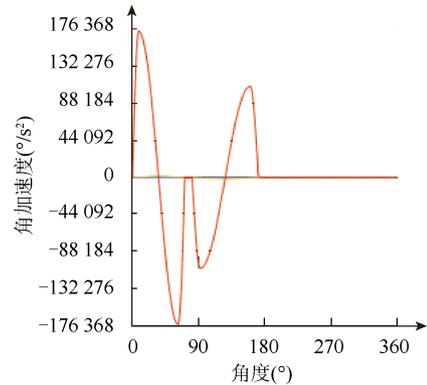


图 9 凸轮特征曲线可视化(角加速度)

Fig. 9 Visualization of cam characteristic curve (angular acceleration)

4 模型运动仿真验证

以图 7 给定的参数为例, 分别用基于转角补偿量的凸轮参数化设计数学模型和不带转角补偿的数学模型创建生成凸轮模型, 在 UG 仿真环境下运动仿真, 仿真生成角加速度曲线如图 10 (基于转角补偿量模型的加速度曲线)和图 11 (无转角补偿量模型的加速度曲线)所示。基于转角补偿量的凸轮参数化设计数学模型生成的凸轮模型最大角加速度为 $175\,500\text{ }^\circ/\text{s}^2$, 无转角补偿量的凸轮参数化设计数学模型生成的凸轮模型最大角加速度为 $242\,600\text{ }^\circ/\text{s}^2$, 基于转角补偿量的凸轮参数化设计数学模型生成的凸轮模型最大角加速度下降了 27.2%。

对比图 9 和图 10 可以看出, 由凸轮曲线可视化生成的角加速度曲线与基于转角补偿量模型的运动仿真角加速度曲线一致, 验证了基于转角补偿量的凸轮参数化设计数学模型的准确性。

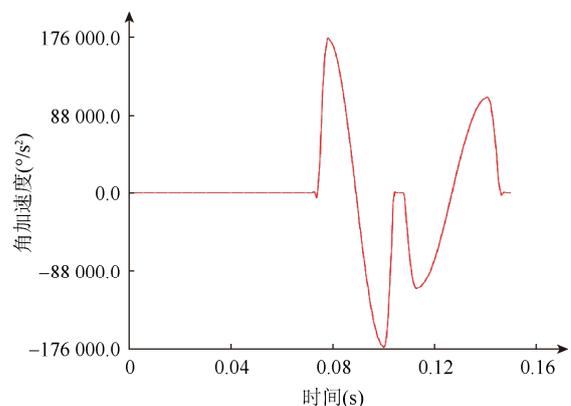


图 10 基于转角补偿量模型的加速度曲线(400 r/min)

Fig. 10 Acceleration curve based on angular compensation (400 r/min)

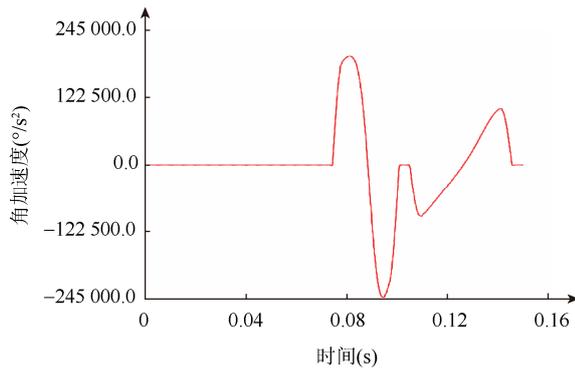


图 11 无转角补偿量模型的加速度曲线(400 r/min)

Fig. 11 Acceleration curve without angular compensation (400 r/min)

5 结束语

本文以凸轮摆杆机构基本参数为基础,应用和凸轮解析法和平面几何理论,分析了凸轮摆杆机构参数化设计过程中凸轮转角偏移问题产生的原因及影响,提出了基于转角补偿量的凸轮参数化设计数学模型,并利用 UG 表达式实现了凸轮摆杆机构到凸轮轮廓曲线的映射。利用 NX Open C 作为编程接口,在 Microsoft Visual Studio 编程环境下实现了操作界面、模板模型与用户模型之间的参数交互访问和修改、表达式访问和导入。通过 `UF_MODL_ask_exps_of_part()` 函数获取模型表达式的 tag 和数量,利用 `UF_PART_import()` 和 `UF_MODL_edit_exp()` 函数实现表达式的导入和参数的编辑。通过在 C# 窗体中引用 NX Open,应用 `NXOpen.Session.GetSession()` 和 `FindObject()` 函数获取当前工作部件的 tag 和表达式,将模型参数传递到 C# 窗体的图表中,从而实现凸轮摆杆机构的角加速度、速度以及位移曲线的一键可视化。

研究表明,推程阶段和回程阶段凸轮轮廓曲线对应的圆心角对比凸轮转角都发生了不同程度的偏移,基于 UG 表达式并引入转角补偿量的凸轮参数化设计方法对比没有考虑转角补偿的方法可以降低从动件的最大加速度,实现凸轮轮廓曲线的精确设计。相比通过其他软件编写曲线方程生成曲线点云的方法,本文方法在实现凸轮轮廓曲线的精确参数化设计的前提下,简化了凸轮摆杆机构的设计和修改流程,提高了产品设计效率,同时对实现产品的标准化、系列化设计也有着广泛的应用价值。

参考文献 (References)

[1] 黄浪,郭顺生,唐红涛,等. 基于 UG 的定型模工程图自动

标注研究[J]. 图学学报, 2016, 37(5): 639-647.

HUANG L, GUO S S, TANG H T, et al. Research on automatic dimensioning of the engineering drawing of the calibrators based on UG[J]. Journal of Graphics, 2016, 37(5): 639-647 (in Chinese).

- [2] 荆浩旗,白海清,王春月,等. 基于 VC++和 UG 二次开发技术的麻花钻参数化设计[J]. 现代制造工程, 2014(7): 51-54, 46.
- JING H Q, BAI H Q, WANG C Y, et al. Parameter design of twist drills based on UG secondary development technology[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2014(7): 51-54, 46 (in Chinese).
- [3] 张帅,陈虎,左平基. 基于 UG 二次开发的智能辅助装配技术[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2012(8): 103-105, 109.
- ZHANG S, CHEN H, ZUO P J. Intelligent auxiliary assembly technology of secondary development based on UG[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2012(8): 103-105, 109 (in Chinese).
- [4] 王冠千,李蓓智,黄顺舟,等. 基于 UG 的发射箱自动化虚拟装配系统开发[J]. 制造技术与机床, 2019(10): 17-20.
- WANG G Q, LI B Z, HUANG S Z, et al. Development of UG-based launch box automation virtual assembly system[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2019(10): 17-20 (in Chinese).
- [5] 杨光. 通过 UG NX 与 VRML 数据交换的虎钳装配研究[J]. 工程图学学报, 2009, 30(4): 204-208.
- YANG G. Vise assembly though data exchange between UG NX and VRML[J]. Journal of Engineering Graphics, 2009, 30(4): 204-208 (in Chinese).
- [6] 曹澍,罗康,何雪明. 弧面分度凸轮机构参数化设计及 NX 二次开发[EB/OL]. 机械科学与技术. [2020-11-29]. <https://doi.org/10.13433/j.cnki.1003-8728.20200173>.
- CAO S, LUO K, HE X M. Parametric design of globoidal indexing CAM mechanism and secondary development of NX[EB/OL]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering. [2020-11-29]. <https://doi.org/10.13433/j.cnki.1003-8728.20200173> (in Chinese).
- [7] 蔡汉明,李宗成,李相飞. C#开发 AutoCAD 在盘形槽凸轮参数化绘制中的应用[J]. 机电工程, 2019, 36(1): 40-43.
- CAI H M, LI Z C, LI X F. Application of C# develop autocad in parameterized drawing of disk cam[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2019, 36(1): 40-43 (in Chinese).
- [8] KATSOULIS T, WANG X, KAKLIS P D. A T-splines-based parametric modeller for computer-aided ship design[J]. Ocean Engineering, 2019, 191: 106433.
- [9] CHEN J N, WANG Y, ZHAO X, et al. Establishment and application of the platform for reverse solution and parametric design platform of the conjugate cam beating-up mechanism[J]. Advanced Materials Research, 2011, 1445(332-334): 303-308.
- [10] 史丽媛,祝锡晶,马继召. 基于 UG 参数化设计系统的研究[J]. 图学学报, 2013, 34(2): 108-112.
- SHI L Y, ZHU X J, MA J Z. A UG-based parametric design system[J]. Journal of Graphics, 2013, 34(2): 108-112 (in Chinese).
- [11] 孟祥旭,徐延宁. 参数化设计研究[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2002, 14(11): 1086-1090.
- MENG X X, XU Y N. A survey of the research works on parametric design[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2002, 14(11): 1086-1090 (in Chinese).