

与机械工程相结合的大学物理教学设计

徐洁如 徐 迅

(南通大学杏林学院, 江苏 南通 226000)

摘 要 大学物理作为理工科专业的一门基础课, 如何与专业课深入结合, 满足专业建设需求, 是大学物理教学改革的重要内容。本文以机械工程专业为例, 将大学物理理论与实际工程相结合, 在教学中融入工程实例, 设计了凸轮机构从动件运动规律分析、伺服电机减速机齿轮传动、离心式水泵能量转换分析、热泵系统利用废热采暖、电容电感式传感器等教学实例。用工程实例讲述物理理论, 实现以专业为导向的大学物理教学。

关键词 大学物理; 机械工程; 专业结合; 教学设计

TEACHING DESIGN OF COLLEGE PHYSICS COMBINED WITH MECHANICAL ENGINEERING

XU Jieru XU Xun

(Xinglin College, Nantong University, Nantong, Jiangsu 226000)

Abstract As a fundamental course in science and engineering majors, how to deeply integrate college physics with professional courses and meet the needs of professional construction is an important content of college physics teaching reform. This article takes the mechanical engineering major as an example, combining college physics theory with practical engineering, and integrating engineering examples into teaching. It designs teaching examples such as analysis of the motion law of cam mechanism follower, gear transmission of servo motor reducer, energy conversion analysis of centrifugal water pump, utilization of waste heat for heating in heat pump systems, and capacitive inductive sensors. Using engineering examples to explain physics theory and achieve professional oriented university physics teaching.

Key words college physics; mechanical engineering; professional integration; instructional design

近年来, 教育部积极引导地方高校向应用型技术型本科院校转型。大学物理作为理工科专业的一门基础课, 如何与专业衔接, 满足专业建设需求, 是教学改革的重要内容。很多学者在教学、教材创新方面进行积极的尝试并取得了一定的成果^[1-7]。

笔者多年来从事大学物理教学工作, 教学团队参与编写了《大学基础物理学》^[8]。该教材为贯彻落实教育部卓越人才培养计划, 根据工程技术人才培养的目标和要求, 对教学内容进行了重新

编排, 在教材的架构上进行了大胆的尝试, 突破了传统教材的框架和内容体系, 针对不同专业提供了不同的选讲模块, 各专业可根据后续专业课程选择任意组合, 以期适应工程技术人才培养的特点。

笔者在学院承担机械工程专业《大学基础物理学》的教学任务, 认为目前的教材, 虽按专业需求调整了教学侧重点, 但教材中缺乏工程实例支撑, 使理论教学与工程应用脱节。迫切需要在教学中引入工程实例, 用工程实例讲述物理理论。

收稿日期: 2023-05-18

基金项目: 大学生创新创业训练计划项目(202213993028Y), 江苏省高校“青蓝工程”项目。

通讯作者: 徐迅, 男, 副教授, xinshoux2@126.com。

引文格式: 徐洁如, 徐迅. 与机械工程相结合的大学物理教学设计[J]. 物理与工程, 2023, 33(5): 102-107.

Cite this article: XU J R, XU X. Teaching design of college physics combined with mechanical engineering[J]. Physics and Engineering, 2023, 33(5): 102-107. (in Chinese)

然而,工程实例大多较为复杂,涉及跨章节跨学科理论知识的综合运用,直接引入课程对学生难度过大,反而适得其反。因此,深入研究工程中的物理理论,从中提炼与课程中知识点相关联的实例,帮助学生更深刻的理解理论并了解其专业实用性,具有很强的现实意义。

本文从运动学、刚体力学、流体力学、热力学、电磁学等几个方面,开展与机械工程相结合的教学设计,为大学物理与专业相结合的教学改革提供思路。

1 “质点运动学”结合凸轮机构运动分析

凸轮机构是机械传动领域常用的机构之一,由凸轮、从动件和机架三个基本构件组成。凸轮是一个具有曲线轮廓或凹槽的构件,当它运动时,通过其上的曲线轮廓与从动件的高副接触,使从动件获得预期的运动。

一凸轮机构如图 1 所示。凸轮以匀角速度 ω 转动,从动件从 A 点开始上升,当凸轮转过角 δ_1 时,从动件到达最高点 B',位移达最大值 h ,该过程称为推程;随后凸轮继续转过 δ_2 ,因凸轮的 BC 段轮廓向径不变,从动件停在最远位置不动,此过程称为远停程;凸轮又继续转过 δ_3 ,从动件由最远位置 B' 回到 A 点,该过程称为回程;最后,凸轮继续转过 δ_4 ,从动件停在 A 处不动,称为近停程。如此往复循环。

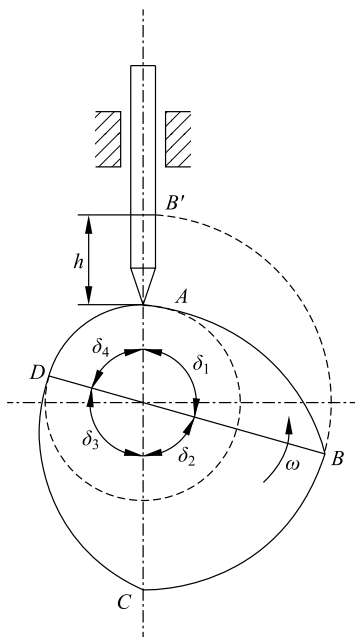


图 1 凸轮机构

运用质点运动学分析推程中从动件的运动规律。

凸轮转角是时间 t 的函数

$$\delta = \omega t \quad (1)$$

从动件位移是凸轮转角 δ 的函数

$$s = f(\delta) \quad (2)$$

该函数的具体形式由凸轮的轮廓曲线决定。

速度方程为

$$v = \frac{ds}{dt} = \frac{ds}{d\delta} \cdot \frac{d\delta}{dt} = \omega \frac{ds}{d\delta} \quad (3)$$

加速度方程为

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{dv}{d\delta} \cdot \frac{d\delta}{dt} = \omega \frac{dv}{d\delta} \quad (4)$$

只要适当地设计凸轮的轮廓曲线,就可以使推杆得到各种预期的运动规律。

以从动件做等速运动为例,运动方程为

$$s = \frac{h}{\delta_1} \delta \quad (5)$$

速度方程为

$$v = \frac{ds}{dt} = \frac{h}{\delta_1} \omega \quad (6)$$

加速度方程为

$$a = \frac{dv}{dt} = 0 \quad (7)$$

可见,从动件上升或下降的速度为常数,但在运动开始和终止的瞬间,速度有突变,其加速度和惯性力在理论上为无穷大,致使凸轮机构产生强烈的振动、冲击、噪声和磨损,这种冲击为刚性冲击。因此,等速运动规律只适用于低速、轻载的场合。按从动件的运动规律,可分为等速运动、等加速运动、简谐运动等,使用时考虑机械工作中的动力特性和便于加工,选择一种或几种运动方式。

将凸轮机构运动融入教学,帮助学生了解质点运动学在工程中的应用,同时更深刻的理解运动学中第一类问题:由运动方程求质点的速度和加速度。

2 “刚体的定轴转动”结合伺服电机减速机齿轮传动

伺服电机是指在伺服系统中控制机械元件运转的发动机。伺服电机可以将电压信号转化为转矩和转速以驱动控制对象,可控制速度,位置精度准确,在工业传动控制领域占有重要地位。伺服电机与普通电机的主要区别是启、停快,这就要求

它具有转动惯量小、启动力矩大、制动迅速的特点。惯量匹配是伺服电机选型过程中的重要步骤。

根据转动定律

$$M = J\alpha = J \frac{d\omega}{dt} \quad (8)$$

系统的转动惯量大,则系统启动时间长,加速慢。系统的惯量小,则系统启动时间短,加速快。

电机带动负载转动时

$$M = (J_m + J_l)\alpha \quad (9)$$

其中, J_m 为电机的转动惯量, J_l 为负载的转动惯量。

为提高系统的负载响应,在原动件与工作机之间添加减速传动装置,称为减速机。减速机是一种动力传达机构,利用齿轮的速度转换器,将马达的回转数减速到所要的回转数,并得到较大的转矩。

根据刚体的定轴转动动能公式

$$E = \frac{1}{2}J\omega^2 \quad (10)$$

经减速机减速后,电机带动负载所需能量为

$$E = \frac{1}{2}J_l \left(\frac{\omega}{i} \right)^2 \quad (11)$$

其中, i 为减速比。

将负载的转动惯量折算到转速为 ω 的电机轴上,负载的等效惯量

$$J'_l = \frac{J_l}{i^2} \quad (12)$$

惯量比是负载等效惯量与电机惯量的比值,加减速机后,惯量比为

$$\lambda = \frac{\frac{J_l}{i^2} + J_s}{J_m} \quad (13)$$

一般建议将惯量比控制在小于 5 的范围,以提高系统响应速度。

将伺服电机减速机齿轮传动融入教学,帮助学生了解刚体力学在工程中的应用,同时更深刻的理解刚体的转动惯量、力矩做功以及刚体绕定轴转动的转动动能。

3 “伯努利原理”结合离心泵送水系统

离心式水泵是一种靠叶轮旋转时产生的离心力来输送液体,即对流体做功的机械装置,离心泵

结构如图 2 所示。离心泵启动后,泵轴带动叶轮作高速旋转,迫使预先充灌在叶片间液体旋转,在惯性离心力的作用下,液体自叶轮中心向外周作径向运动。液体在流经叶轮的流动过程获得能量,静压能增高,流速增大。

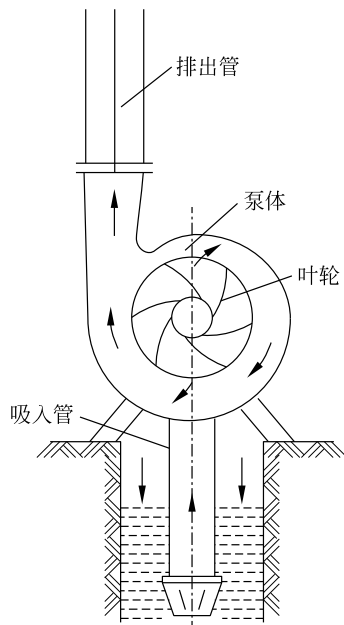


图 2 离心式水泵

当液体离开叶轮进入泵壳后,由于壳内流道逐渐扩大而减速。从叶轮边沿到泵的出口处,若忽略阻力损失,列伯努利方程

$$Z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} \quad (14)$$

忽略高度差, $Z_1 = Z_2$, 则

$$P_2 - P_1 = \frac{1}{2}\rho(v_1^2 - v_2^2) \quad (15)$$

可见,流体的动能(速度头)转化为静压能(静压头),流速降低可以减小流体在管道内流动时的沿程阻力损失。所以泵壳的作用不仅在于汇集液体,也是一个能量转换装置。

当液体自叶轮中心甩向外周时,叶轮中心形成低压区,在贮槽液面与叶轮中心总势能差的作用下,液体被吸进叶轮中心。依靠叶轮的不断运转,液体便连续地被吸入和排出。

离心泵压头又叫扬程,是指单位重量液体流经离心泵后获得的有效能量,是离心泵的重要工作性能参数。对如图 3 所示的离心泵送水系统,将流体从截面 1—1' 运送到截面 2—2', 对两截面用伯努利方程

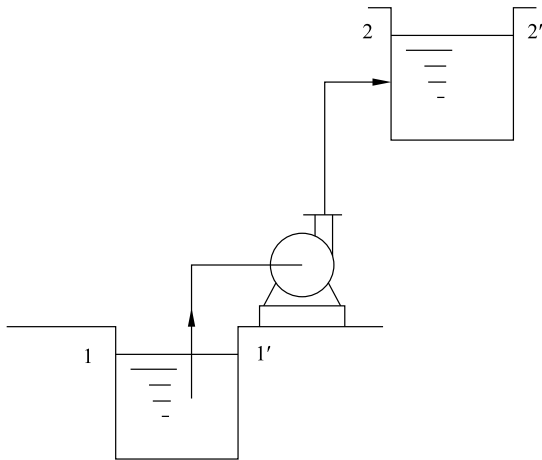


图3 离心泵送水系统

$$Z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} + H = Z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + \sum H_f \quad (16)$$

其中, H 为离心泵压头。

$$H = \Delta Z + \frac{\Delta P}{\rho g} + \frac{\Delta v^2}{2g} + \sum H_f \quad (17)$$

可见,离心泵压头 H 用于提高流体的动能、位能、静压能,或用于克服沿程阻力。

将离心泵送水系统融入教学,帮助学生了解流体力学在机械中的应用,同时更深刻的理解伯努利方程。

4 “热力学循环过程”结合热泵系统

在当前世界能源危机以及国内“双碳”背景下,热泵技术成为近年来在全世界倍受关注的新能源技术。热泵技术广泛应用于“煤改电”家庭采暖、畜牧业养殖供暖、工农业服务业烘干等领域。

热泵利用少量高品位电能作为驱动,从低温分散的热源吸收低品位热能并传输给高温热源,达到“泵热”的目的。目前,应用最普遍的是空气源蒸汽压缩式热泵,运用逆卡诺循环原理,用电能驱动压缩机,将制冷剂压缩成高温高压气体;进入冷凝器放热,被冷凝成高压液体;高压液体经膨胀阀节流降压后,在蒸发器中吸收空气中的热量,蒸发成低温低压气体,又被吸入压缩机中压缩,如此反复循环。热泵系统的组成如图4所示。

制热系数 COP 是衡量热泵性能的重要指标,又称为能效比。设制热量为 Q ,压缩机输入功为 W ,则

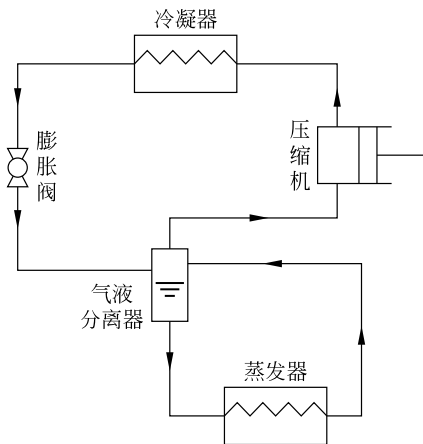


图4 热泵系统

$$COP = \frac{Q}{W} \quad (18)$$

设用电能拖动热泵供热,所利用废热的温度为 T_2 ,向室内供热温度为 T_1 ,热泵采用逆卡诺循环,则热泵的理论制热系数

$$COP = \frac{T_1}{T_1 - T_2} \quad (19)$$

若按废热温度 10°C ,供热温度 40°C 计算,该理论值可达 10.4。

目前热泵的 COP 通常在 3~4。而传统的电热水器、燃气锅炉等设备则因能量转换的过程中存在损失,其 COP 不超过 1。

将热泵系统融入教学,帮助学生了解热力学在工程中的应用,同时更深刻的理解热力学过程、循环系统、逆卡诺循环等理论。

5 “电磁学”结合电容、电感式传感器

电容式传感器是一种能将非电量转换成电容量变化的传感器件。

如图5所示的一平板形厚度传感器,极板面积为 S ,极板间距离为 δ ,极板间被测物体厚度为 δ_x ,电容率为 ϵ 。

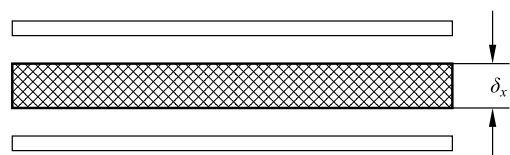


图5 平板形厚度传感器

将其视为由一个极板间距为 $\delta - \delta_x$ 的空气平行板电容器和一个极板间距为 δ_x ,电容率为 ϵ 的

电介质电容器串联而成,如图6所示。其中

$$C_1 = \frac{\epsilon_0 S}{\delta - \delta_x} \quad (20)$$

$$C_2 = \frac{\epsilon S}{\delta_x} \quad (21)$$

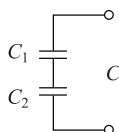


图6 厚度传感器等效电容

由电容器串联公式

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \quad (22)$$

可得该传感器电容与电介质厚度的关系

$$C = \frac{S}{(\delta - \delta_x)/\epsilon_0 + \delta_x/\epsilon} \quad (23)$$

如图7所示的一平板形线位移传感器,当进入两极板间的电介质长度发生变化时,电容随之改变。设极板的长为 a ,宽为 b ,进入极板间的电介质长度为 l_x 。

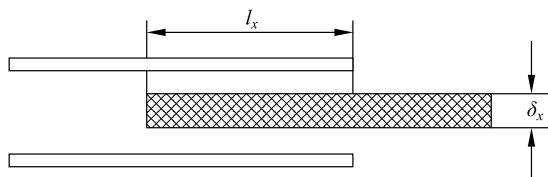


图7 平板形线位移传感器

将其视为如图8所示的等效电容器,其中

$$C_1 = \frac{\epsilon_0 b l_x}{\delta - \delta_x} \quad (24)$$

$$C_2 = \frac{\epsilon b l_x}{\delta_x} \quad (25)$$

$$C_3 = \frac{\epsilon_0 b (a - l_x)}{\delta} \quad (26)$$

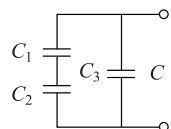


图8 位移传感器等效电容

可得该传感器电容与电介质位移的关系

$$C = \frac{b l_x}{(\delta - \delta_x)/\epsilon_0 + \delta_x/\epsilon} + \frac{b(a - l_x)}{\delta/\epsilon_0} \quad (27)$$

以上两个实例结合了平行板电容器计算公式及电容器串并联公式。

电感式传感器,是利用电磁感应原理将被测量如位移、压力、振动等转换成线圈自感 L 或互感 M 的变化,再由测量电路转换为电压或电流的变化输出。

一自感传感器由线圈、铁芯、衔铁组成,铁芯和衔铁之间的气隙,传感器的运动部分与衔铁相连,衔铁移动时,气隙厚度发生变化,引起传感器自感变化,如图9所示。

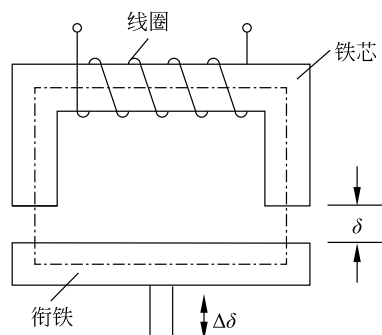


图9 自感传感器

设线圈匝数为 N ,原气隙厚度为 δ ,气隙层截面积为 S ,初始自感为

$$L_0 = \frac{\mu_0 N^2 S}{2\delta_0} \quad (28)$$

衔铁上移 $\Delta\delta$ 时, $\delta = \delta_0 - \Delta\delta$,可得自感与位移的关系

$$L = \frac{\mu_0 N^2 S}{2(\delta_0 - \Delta\delta)} = \frac{L_0}{1 - \frac{\Delta\delta}{\delta_0}} \quad (29)$$

该实例结合了螺线管自感公式。

将各类检测传感器融入教学,帮助学生了解电磁学在工程中的应用,同时更深刻的理解电容、电感等理论。

6 结语

将工程实例引入大学物理课程,是实现大学物理与专业结合,满足专业建设需求的重要途径。但工程实例大多较为复杂,涉及跨章节跨学科理论知识的综合运用,直接引入课程对学生难度过大,反而适得其反。本文以机械工程专业为例,深入研究工程中的物理理论,从中提炼与课程知识点相关联的实例,设计了凸轮机构运动规律分析、伺服电机减速机齿轮传动系统、离心泵送水系统、热泵系统、电容电感式传感器等教学实例,帮助学生更深刻的理解物理理论并了解其专业实用性,

为大学物理与专业相结合的教学改革提供思路。

参 考 文 献

- [1] 张婷, 吴伟, 孙仕海. 用大学物理知识诠释前沿科技——从光的偏振到量子通信[J]. 物理与工程, 2023, 33(1): 14-19.
ZHANG T, WU W, SUN S H. Elaborating frontier technologies using college physics knowledges—From polarization of light to quantum communication[J]. Physics and Engineering, 2023, 33(1): 14-19. (in Chinese)
- [2] 武海波, 宋加俊. 非物理学工科专业大学物理教学现状与建议[J]. 物理通报, 2022(10): 6-9.
WU H B, SONG J J. Current situation and suggestions of university physics teaching for non physics engineering majors[J]. Physics Bulletin, 2022(10): 6-9. (in Chinese)
- [3] 杨开巍, 李旭光, 孙锡良. 大学物理教学中导入课程思政元素的技巧与方法[J]. 物理与工程, 2021(6): 109-113.
YANG K W, LI X G, SUN X L. Skills and methods of introducing ideological and political elements into college physics teaching [J]. Physics and Engineering, 2021, 31(6): 109-113. (in Chinese)
- [4] 张师平, 吴平, 闫丹, 等. 将拉曼光谱技术引入大学物理课堂教育的浅析[J]. 物理与工程, 2020, 30(5): 82-85.
ZHANG S P, WU P, YAN D, et al. Brief analysis on Raman spectroscopy into college physics education[J]. Physics and Engineering, 2020, 30(5): 82-85. (in Chinese)
- [5] 刘一曼, 刘敏. “新工科”视域下土木工程专业“大学物理”课程改革探索[J]. 教育教学论坛, 2020, 49(12): 200-201.
LIU Y M, LIU M. The course reform of college physics in civil engineering specialty under the background of “emerging engineering” education: A case study of China Three Gorges University[J]. Education Teaching Forum, 2020, 49(12): 200-201. (in Chinese)
- [6] 崔海瑛, 崔莲. 大学物理模块化教学改革探究——以力学教学内容为例[J]. 黑龙江教育(高教研究与评估), 2017(9): 26-27.
CUI H Y, CUI L. Exploration of modular teaching reform in college physics—Taking the teaching content of mechanics as an example[J]. Heilongjiang Education (Higher Educational Research and Evaluation), 2017(9): 26-27. (in Chinese)
- [7] 廖健飞. 大学物理知识实用化的教学探究[J]. 高教学刊, 2021, 7(22): 91-93, 99.
LIAO J F. Teaching exploration on the practical application of college physics knowledge[J]. Journal of Higher Education, 2021, 7(22): 91-93, 99. (in Chinese)
- [8] 沐仁旺, 葛一兵. 大学基础物理学[M]. 江苏: 江苏大学出版社, 2013.
- [9] 李明达, 董乔南, 杨亚利, 等. 利用非线性动力学系统研究混沌现象[J]. 物理与工程, 2019, (6): 77-84.
LI M, DONG Q N, YANG Y L, et al. Study of chaos with nonlinear dynamical system[J]. Physics and Engineering, 2019, 29(6): 77-84. (in Chinese)
- [10] ZHU H, CHAPMAN S C, DENDY R O. Robustness of predator-prey models for confinement regime transitions in fusion plasmas[J]. Physics of Plasmas, 2013, 20(4): 042302.
- [11] STROGATZ S H. 非线性动力学与混沌[M]. 孙梅, 汪小帆等, 译. 北京: 机械工业出版社, 2016.
- [12] 周道其. 科学家揭开惠更斯复摆钟之谜[J]. 现代物理知识, 2002, 14(5): 1.
ZHOU D Q. Scientist shave solved the mystery of Huygens' compound pendulum clock[J]. Review of World Invention, 2002, 14(5): 1. (in Chinese)
- [13] 陈明晖, 邓明立. 庞加莱微分方程定性理论研究初探——兼纪念庞加莱诞辰 150 周年[J]. 科学, 2004, (1): 29-31.
CHEN M H, DENG M L. A Preliminary study on the Qualitative Theory of Poincaré's differential Equation—Also commemorating the 150th anniversary of Poincaré's birth [J]. Science, 2004, 56(1): 29-31. (in Chinese)
- [14] LORENZ E N. Deterministic nonperiodic flow[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1963, 20(2): 130-141.
- [15] 叶美盈. 一种非线性动力学系统数值模拟的新方法[J]. 云南师范大学学报: 自然科学版, 2000, (2): 33-36.
YE M Y. A new approach to the numerical simulation of nonlinear dynamics[J]. Journal of Yunan Normal University (Natural sci ed), 2000, 20(2): 33-36. (in Chinese)
- [16] MCCracken G H, STOTT P. 宇宙能源——聚变[M]. 核工业西南物理研究院翻译组. 北京: 原子能出版社, 2008.
- [17] LI S, JIANG H, REN Z, et al. Optimal tracking for a divergent-type parabolic PDE system in current profile control[C]//ZHANG X G. Abstract and Applied Analysis. New York: Hindawi Publishing Corporation, 2014: 1-8.
- [18] 刘爱红, 余守宪. 轴对称缓变磁场中的等离子体与磁约束原理[J]. 物理与工程, 2002, (5): 14-17.
LIU A H, YU S H X. Plasma in slow-varying magnetic field with axial-symmetry and principle of magnetic confinement[J]. Physics and Engineering, 2002, 12(5): 14-17. (in Chinese)
- [19] WAGNER F. Regime of Improved Confinement and High Beta in Neutral-Beam-Heated Divertor Discharges of the ASDEX Tokamak[J]. Physical Review Letters, 1982, 49(19): 1408-1412.
- [20] BURRELL K H. Effects of $E \times B$ velocity shear and magnetic shear on turbulence and transport in magnetic confinement devices[J]. Physics of Plasmas, 1997, 4(5): 1499-1518.
- [21] MALKOV M A, DIAMOND P H. Weak hysteresis in a simplified model of the LH transition[J]. Physics of Plasmas, 2009, 16(1): 012504.