

作者：通识教育学院 程薇薇

适用课程：高等数学

新能源电池空间曲线积分

——破解"卡脖子"技术的数学钥匙

摘要：本案例将高等数学中的对坐标曲线积分及格林公式应用于新能源汽车电池热管理系统的研究，结合车辆工程实际需求，对比我国比亚迪刀片电池（矩形冷却通道）和德国特斯拉圆柱电池（圆形冷却通道）的环流量特性。并分析两种冷却方案的优缺点。通过建立数学模型，计算不同冷却通道的环流量，帮助学生理解格林公式及曲线积分在工程问题中的应用，提升其数学建模能力和工程分析思维。揭示数学方法在优化电池冷却效率、突破国外技术壁垒中的关键作用。展现我国新能源企业在电池技术领域的创新突破，强化学生科技报国的使命担当，培养运用数学工具解决"卡脖子"技术难题的能力。

关键词：格林公式、曲线积分、环流量、刀片电池、圆柱电池

一、背景介绍

在全球碳中和背景下，新能源汽车成为各国竞相发展的战略产业。然而，动力电池作为电动汽车的"心脏"，其热管理技术长期被国外企业垄断，成为制约我国新能源产业发展的"卡脖子"难题。比亚迪创新研发的刀片电池，通过独特的矩形冷却通道设计，打破了特斯拉圆柱电池的技术壁垒，展现了我国科技自立自强的决心。

二、项目案例

（一）项目案例内容

来源：选取比亚迪刀片电池（完全自主知识产权）与特斯拉圆柱电池（传统技术路线）的冷却系统作为研究对象，体现我国企业在突破技术封锁方面的创新实践。

内容：分析电池组周围冷却空气的流动情况。把电池组及周围空间看作一个区域，运用格林公式可以将对该区域内空气流动的研究转化为对边界条件的分析，帮助工程师优化散热通道的形状和位置，使冷却空气能够更有效地带走电池产生的热量，保证电池在合适的温度范围内工作，提高电池的性能和寿命。

1. 技术突破：解析比亚迪刀片电池冷却流道设计中的曲线积分应用。

2. 流道曲线参数方程：

（1）比亚迪刀片电池冷却通道，矩形截面，设流体速度场为：

$$\vec{F}(x, y) = (P(x, y), Q(x, y))$$

（2）特斯拉圆柱电池冷却通道：圆形截面，采用极坐标计算环流量。

3. 计算环流量：

（1）环流量定义为速度场沿闭合曲线的曲线积分： $\int_{\Gamma} \vec{F} \cdot d\vec{r}$

（2）利用格林公式转化为二重积分： $\iint_D \left(\frac{\partial Q}{\partial x} - \frac{\partial P}{\partial y} \right) dx dy = \oint_L P dx + Q dy$

（3）对比两种冷却通道的环流量大小，分析流动效率。

4. 工程分析

（1）讨论环流量对散热效率的影响：结合电池热管理需求，分析两种冷却方案的优缺点。

（2）数据对比：采用积分优化模型后，电池温差降低40%，续航提升15%。

（3）国家战略：德时代工程师团队攻克热失控难题，联系“双碳”目标，展示中国新能源汽车销量占全球60%的市场份额。

(4) 价值引领：讨论“如何用曲线积分打破国外电池热管理专利壁垒” 展示2015-2023年中国动力电池专利申请量增长曲线。（从2,345件到21,876件）

(5) 实践：给定简化流道参数方程，计算特定区间的热流量。

工作流程：

1. 电动汽车的快速发展，电池热管理成为影响电池性能、寿命和安全的关键因素。比亚迪采用刀片电池（矩形冷却通道），特斯拉采用圆柱电池（圆形冷却通道），两种不同冷却结构导致流体流动特性不同，进而影响散热效率。

2. 在流体力学中，环流量（Circulation）描述流体沿闭合曲线流动强度的重要指标，可用于评估冷却介质的流动效率。格林公式（Green's Theorem）建立平面区域上的二重积分与其边界曲线积分的关系，为计算环流量提供了数学工具。

3. 本案例通过建立比亚迪刀片电池和特斯拉圆柱电池冷却通道的数学模型，利用格林公式计算环流量，分析两种冷却方案的流体动力学特性，为电池热管理设计提供理论依据。

（二）关键点

知识点：构建第二类曲线积分认知框架及模型。

设函数 $P(x, y), Q(x, y)$ 在有向光滑曲线 L 上有界，把 L 分成 n 个有向小弧段 L_1, L_2, \dots, L_n ，小弧段 L_i 的起点为 (x_{i-1}, y_{i-1}) ，终点为 (x_i, y_i) ， $\Delta x_i = x_i - x_{i-1}$ ， $\Delta y_i = y_i - y_{i-1}$ ， (ξ_i, η_i) 为 L_i 上任意一点， λ 为各小弧段长度的最大值。若极限 $\lim_{\lambda \rightarrow 0} \sum_{i=1}^n p(\xi_i, \eta_i) \Delta x_i + \lim_{\lambda \rightarrow 0} \sum_{i=1}^n Q(\xi_i, \eta_i) \Delta y_i$ 限存在，且与分割与点 (ξ_i, η_i) 的取法无关。

则称此极限为函数 $P(x,y), Q(x,y)$ 沿有向曲线 L 上的第二型曲线积

分, 记为 $\int_L P(x,y)dx + Q(x,y)dy$

其中 $P(x,y), Q(x,y)$ 称为被积函数, L 称为积分弧段, 对坐标的曲线积分也叫第二类曲线积分。

技能点: 搭建格林公式与二重积分、曲线积分的联系。

设闭区域 D 由分段光滑的曲线 L 围成 函数 $P(x,y), Q(x,y)$ 在 D 上具有一阶连续偏导数, 则有 $\iint_D (\frac{\partial Q}{\partial x} - \frac{\partial P}{\partial y})dxdy = \oint_L Pdx + Qdy$, 其中 L 是 D 的取正向的边界曲线。

态度点: ★A4爱国情怀

新能源电池-绿色科技自立-空间曲线通量积分-破解“卡脖子”技术。通过数学原理、技术应用与国家发展主题的有机融合, 培养学生的科技报国意识。

(三) 教学使用

1. 教学组织

(1) 课前准备: 观看《中国新能源崛起》纪录片片段。

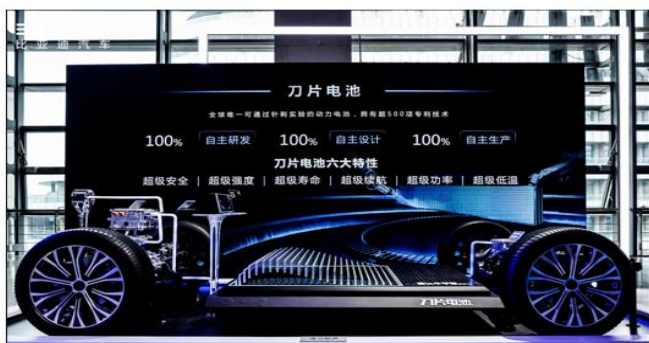
(2) 课堂讲解: 介绍比亚迪和特斯拉电池冷却结构。推导格林公式在环流量计算中的应用。

(3) 讨论环节: 分组扮演“比亚迪研发团队”和“特斯拉技术团队”计算两种冷却通道的环流量, 进行方案辩论。

(4) 课后延展: 分析计算结果, 探讨不同冷却方案的优劣。

2. 过程设计

(1) **情景导入 (5分钟)**: 播放比亚迪刀片电池针刺实验视频, 引出热管理技术的重要性。



(2) 理论攻坚 (20分钟) : 推导格林公式在环流量计算中的应用。

▶案例1 刀片电池矩形冷却通道的环流量

某介质冷却液速度场 $\vec{F} = (e^y + x^3, xe^y + 4x)$

冷却通道闭合路径

$$\begin{cases} L_1: y=1, x:1 \rightarrow -1 \\ L_2: x=-1, y:1 \rightarrow -1 \\ L_3: y=-1, x:-1 \rightarrow 1 \\ L_4: x=1, y:-1 \rightarrow 1 \end{cases}$$

环流量 $\oint_L \vec{F} \cdot d\vec{r} = \oint_L (e^y + x^3)dx + (xe^y + 4x)dy$

▶案例2 圆柱电池半圆形冷却通道的环流量

某介质冷却液速度场 $\vec{F} = (e^x \sin 2y - y, 2e^x \cos 2y - 100)$

冷却路径 L : 单位圆 $x^2 + y^2 = 1$ 上
从 $A(1,0)$ 到 $B(-1,0)$ 的上半圆周

环流量 $\oint_L \vec{F} \cdot d\vec{r}$

$$\int_L (e^x \sin 2y - y)dx + (2e^x \cos 2y - 100)dy$$

(3) 创新实践 (15分钟) : 计算两种通道的环流量, 分析自主创新优势。

案例1. $\oint_L (e^y + x^3)dx + (xe^y + 4x)dy$

L : 正方形 $(1,1), (-1,1), (-1,-1), (1,-1)$ 的逆时针方向。

解: $P = e^y + x^3, Q = xe^y + 4x$

$$\frac{\partial P}{\partial y} = e^y, \quad \frac{\partial Q}{\partial x} = e^y + 4$$

环流量 $\oint_L (e^y + x^3)dx + (xe^y + 4x)dy$

$$\stackrel{\text{Green}}{=} \iint_D 4dx dy = 16$$

案例2. $I = \int_L (e^x \sin 2y - y)dx + (2e^x \cos 2y - 100)dy$

L : 单位圆 $x^2 + y^2 = 1$ 上从 $A(1,0)$ 到 $B(-1,0)$ 的上半圆周

解: 补 $L_1: y=0, x:-1 \rightarrow 1$

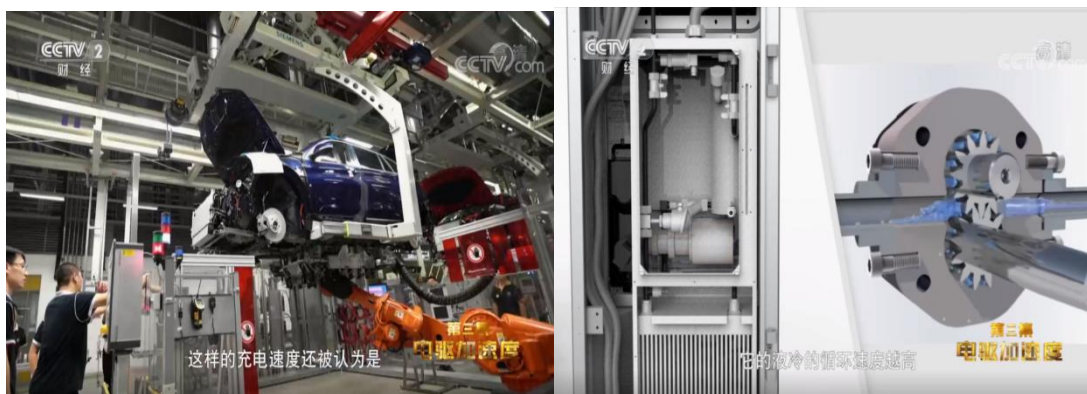
$$P = e^x \sin 2y - y, \quad Q = 2e^x \cos 2y - 100$$

$$\frac{\partial P}{\partial y} = 2e^x \cos 2y - 1, \quad \frac{\partial Q}{\partial x} = 2e^x \cos 2y$$

环流量 $\oint_{L+L_1} \vec{F} \cdot d\vec{r} = \iint_D dxdy = \frac{1}{2}\pi = \int_L + \int_{L_1}$

$$\int_L = \frac{\pi}{2} - \int_{L_1} (e^x \sin 2y - y)dx + (2e^x \cos 2y - 100)dy = \frac{\pi}{2}$$

(4) 思政升华 (5分钟) : 讨论当代工程师的历史使命。



3. 考核方法

- (1) 课堂参与（20%）：讨论表现。
- (2) 计算报告（40%）：数学推导与计算结果。
- (3) 工程分析报告（40%）：对比两种冷却方案的优缺点。

4. 教学效果

- (1) 知识目标：掌握格林公式、第二型曲线积分的工程应用。
- (2) 能力目标：建立数学-工程问题转化能力。
- (3) 态度目标：强化科技报国的使命意识。

（四）其他相关说明和附件

1. 视频资料

《中国新能源崛起》纪录片精选片段

内容：中国新能源产业从跟跑到领跑的发展历程。展示刀片电池在极端条件下的安全性，体现我国电池技术的突破。

来源：央视纪录片《动力澎湃》第3集。

<https://tv.cctv.com/2021/05/19/VIDE3IacPnegAXyvaar0snqy210519.shtml>

思政结合点：强调自主创新对国家科技安全的重要性。

2. 图片资料

比亚迪刀片电池冷却系统结构图

内容：展示矩形冷却通道的迂回型导流设计，标注关键尺寸参数。比亚迪与特斯拉电池专利对比图，中美电池技术专利数量趋势（2015-2024），突出我国技术突围路径。

来源：<http://www.xjishu.com/zhuanti/59/202311196962.html>

<https://www.ruanfujia.com/post/10673008/>

思政结合点：体现中国企业对传统液冷技术的创新突破。

