

微分方程

何震邦

微分方程

一階 ODE

線性

變數可分離

恰當-積分乘數

伯努力

齊次

幾乎線性

含線性分式

以 $t^n x$ 替代

微分方程

何震邦 <jdh8.org>



2014 年 12 月 30 日

常微分方程與偏微分方程

微分方程

何震邦

微分方程

一階 ODE

線性

變數可分離

恰當-積分乘數

伯努力

齊次

幾乎線性

含線性分式

以 $t^n x$ 替代

函數方程中，有待解函數的導函數項時，稱為微分方程。例如

$$\sin(x) x'' = (x + 1) x' + x^2 e^{-3x}. \quad (1)$$

$$x^{(4)} + x''' + x'' + x = \cos(t) \quad (2)$$

以上微分方程只有常導數，所以是**常微分方程** (ODE). 有偏導數的方程是**偏微分方程** (PDE)，例如

$$u_{xxt} = u_y + 1. \quad (3)$$

階

微分方程

何震邦

微分方程

一階 ODE

線性

變數可分離

恰當-積分乘數

伯努力

齊次

幾乎線性

含線性分式

以 $t^n x$ 替代

微分方程的**階**是方程中最高階導數的階。例如 (1) 是二階微分方程，(3) 是三階微分方程，而 (2) 是四階微分方程。

線性微分方程

微分方程

何震邦

微分方程

一階 ODE

線性

變數可分離

恰當—積分乘數

伯努力

齊次

幾乎線性

含線性分式

以 $t^n x$ 替代

線性微分方程可以寫成以下的形式：

$$\sum_{k=0}^n f_k(t)x^{(k)}(t) = g(t)$$

其中 t 是自變數， x 是待解函數， f_k 和 g 是已知函數，如 (2)。

解

微分方程

何震邦

微分方程

一階 ODE

線性

變數可分離

恰當-積分乘數

伯努力

齊次

幾乎線性

含線性分式

以 $t^n x$ 替代

從足微分方程的函數稱為**解**或**特解**。解可能有自變數的範圍限制。

Example

在 $t > 0$ 時， $x = t^{-3/2}$ 是 $4t^2x'' + 12tx' + 3x = 0$ 的解。

Proof.

$$x' = -\frac{3}{2}t^{-5/2}$$

$$x'' = -\frac{15}{4}t^{-7/2}$$

$$4t^2 \left(-\frac{15}{4}t^{-7/2} \right) + 12t \left(-\frac{3}{2}t^{-5/2} \right) + 3t^{-3/2} = 0. \quad \square$$

初始條件

微分方程

何震邦

微分方程

一階 ODE

線性

變數可分離

恰當-積分乘數

伯努力

齊次

幾乎線性

含線性分式

以 $t^n x$ 替代

初始條件形如

$$x_k = x^{(k)}(t_0)$$

例如

$$x_0 = x(t_0).$$

初值問題

微分方程

何震邦

微分方程

一階 ODE

線性

變數可分離

恰當-積分乘數

伯努力

齊次

幾乎線性

含線性分式

以 $t^n x$ 替代

初值問題是有適當初始條件的微分方程。

Example

以下是初值問題。

$$t^2 x'' + 2tx' + 3x = 0$$

$$x(4) = 1$$

$$x'(4) = 2.$$

有效範圍

微分方程

何震邦

微分方程

一階 ODE

線性

變數可分離

恰當—積分乘數

伯努力

齊次

幾乎線性

含線性分式

以 $t^n x$ 替代

對於有初始條件

$$x_k = x^{(k)}(t_0)$$

的微分方程而言，**有效範圍**是包含 t_0 且解有效的最大範圍。

通解

微分方程

何震邦

微分方程

一階 ODE

線性

變數可分離

恰當-積分乘數

伯努力

齊次

幾乎線性

含線性分式

以 $t^n x$ 替代

通解是微分方程的解的最廣義的形式。

Example

$$2tx' + 4x = 3$$

的通解是

$$x = \frac{c}{t^2} + \frac{3}{4}$$

其中 c 是任意常數。

實際解

微分方程

何震邦

微分方程

一階 ODE

線性

變數可分離

恰當-積分乘數

伯努力

齊次

幾乎線性

含線性分式

以 $t^n x$ 替代

同時符合微分方程與附屬條件（像是初始條件）的解，是**實際解**。

Example

求解

$$2tx' + 4x = 3 \quad x(1) = -4.$$

Solution

已經有通解了，所以我們只要代入初始條件，求取待定常數 c 。

$$4 = \frac{c}{1^2} + \frac{3}{4} \quad c = -\frac{19}{4}$$

$$x = \frac{3}{4} - \frac{19}{4t^2}.$$

顯式解與隱式解

微分方程

何震邦

微分方程

一階 ODE

線性

變數可分離

恰當—積分乘數

伯努力

齊次

幾乎線性

含線性分式

以 $t^n x$ 替代

若待解函數為 x 而自變數為 t ，**顯式解**形如

$$x = f(t).$$

以其他方式寫出待解函數與自變數的關係的，為**隱式解**，像是

$$F(x, t) = 0.$$

從隱式解推出顯式解

微分方程

何震邦

微分方程

一階 ODE

線性

變數可分離

恰當-積分乘數

伯努力

齊次

幾乎線性

含線性分式

以 $t^n x$ 替代

Example

$$x' = \frac{t}{x} \quad x(2) = -1$$

的隱式解為

$$x^2 = t^2 - 3$$

求顯式解。

Solution

乍看之下有 $x = \pm\sqrt{t^2 - 3}$ 兩解，但只有負的合初值條件。

$$x = -\sqrt{t^2 - 3}.$$

一階常微分方程

微分方程

何震邦

微分方程

一階 ODE

線性

變數可分離

恰當-積分乘數

伯努力

齊次

幾乎線性

含線性分式

以 $t^n x$ 替代

一階常微分方程為符合以下形式的方程式：

$$\frac{dx}{dt} = f(x, t)$$

其中 f 不含微分項。

方法 1：一階線性微分方程

微分方程

何震邦

微分方程

一階 ODE

線性

變數可分離

恰當-積分乘數

伯努力

齊次

幾乎線性

含線性分式

以 $t^n x$ 替代

Theorem

給定微分方程

$$f(t)x' + g(t)x = h(t).$$

設 $A(t) = \frac{g(t)}{f(t)}$ 與 $B(t) = \frac{h(t)}{f(t)}$ ，將方程化為

$$x' + Ax = B.$$

則 $e^{\int A dt}$ 為一積分乘數，使得通解為

$$x = e^{-\int A dt} \left(c + \int e^{\int A dt} B dt \right).$$

通解的證明

微分方程

何震邦

微分方程

一階 ODE

線性

變數可分離

恰當-積分乘數

伯努力

齊次

幾乎線性

含線性分式

以 $t^n x$ 替代

Proof.

設 $P = \int A dt$ ，則

$$x' + P' x = B$$

$$e^P x' + e^P P' x = e^P B$$

$$(e^P x)' = e^P B$$

此時積分，引進積分常數 c 。

$$e^P x = c + \int e^P B dt$$

$$x = e^{-\int A dt} \left(c + \int e^{\int A dt} B dt \right). \quad (4)$$



有效區間

微分方程

何震邦

微分方程

一階 ODE

線性

變數可分離

恰當-積分乘數

伯努力

齊次

幾乎線性

含線性分式

以 $t^n x$ 替代

Theorem

給定微分方程

$$x' + Ax = B$$

與初始條件

$$x_0 = x(t_0).$$

若函數 A, B 在區間 (a, b) 中連續，且 $a < t_0 < b$ ，則 x 在此區間中有唯一解。

證明從略，因為解的形式可以通解 (4) 中獲得。

特殊狀況

微分方程

何震邦

微分方程

一階 ODE

線性

變數可分離

恰當-積分乘數

伯努力

齊次

幾乎線性

含線性分式

以 $t^n x$ 替代

給定微分方程

$$x' + Ax = B.$$

若 B 為零，即原方程齊次，則通解成為

$$x = ce^{-\int A dt}.$$

若 A 為常數，則 $\int A dt = At$ ，使通解成為

$$x = e^{-At} \left(c + \int e^{At} B dt \right).$$

常係數一階線性微分方程

微分方程

何震邦

微分方程

一階 ODE

線性

變數可分離

恰當-積分乘數

伯努力

齊次

幾乎線性

含線性分式

以 $t^n x$ 替代

給定微分方程

$$x' + Ax = B.$$

若 A 與 B 皆為常數，即原方程常係數，則設 $x^* = B/A$,

$$x' + A(x - x^*) = 0$$

再設 $y = x - x^*$ ，原方程簡化成常係數齊次方程
 $y' + Ay = 0$ ，通解顯然為

$$y = c_1 e^{-Ay}$$

$$x = c_2 e^{-Ax} + x^*$$

其中 c_1 為積分常數，而 $c_2 = c_1 e^{Ax^*}$.

指數衰變

微分方程

何震邦

微分方程

一階 ODE

線性

變數可分離

恰當-積分乘數

伯努力

齊次

幾乎線性

含線性分式

以 $t^n x$ 替代

Example

An exponential decay function $f(t) = y_0 e^{-kt}$ models the amount of drug in the blood t hours after an initial dose of $y_0 = 100$ mg is administered. Assume the half-life of a particular drug is 16 hours. How much time is required for the drug to reach 1% of the initial dose (1 mg)?

Solution

$$50 = 100e^{-16k}$$

$$k = \frac{\ln(2)}{16}$$

$$1 = 100e^{-\frac{\ln(2)}{16}t}$$

$$t = 16 \log_2(100) \approx 106.30169903639559513 \text{ (小時)}.$$



方法 2：變數可分離的微分方程

微分方程

何震邦

微分方程

一階 ODE

線性

變數可分離

恰當-積分乘數

伯努力

齊次

幾乎線性

含線性分式

以 $t^n x$ 替代

Theorem

給定微分方程

$$A(x) B(t) x' = C(x) D(t).$$

通解為

$$\int \frac{A(x)}{C(x)} dx = \int \frac{D(t)}{B(t)} dt.$$

證明從略。

有效區間

微分方程

何震邦

微分方程

一階 ODE

線性

變數可分離

恰當-積分乘數

伯努力

齊次

幾乎線性

含線性分式

以 $t^n x$ 替代

Theorem

給定微分方程

$$P(x) x' = Q(t)$$

與初始條件

$$x_0 = x(t_0)$$

若在 $a < t < b$ 時，函數 P, Q 處處連續，則在此有實際解

$$\int_{x_0}^x P(u) du = \int_{t_0}^t Q(v) dv.$$

由換元積分得證。

Logistic 成長，頁 1

微分方程

何震邦

微分方程

一階 ODE

線性

變數可分離

恰當-積分乘數

伯努力

齊次

幾乎線性

含線性分式

以 $t^n x$ 替代

Example

A population grows according to the logistic differential equation $y' = 0.0003y(2000 - y)$. The initial population size is 800. Solve this differential equation and use the solution to predict to population size at time $t = 3$.

本題為一個初期值問題

$$\begin{cases} y'(t) = 0.0003y(t)(2000 - y(t)) \\ y(0) = 800 \end{cases}$$

原微分方程為變數可分離的微分方程。

$$10000y' = 3y(2000 - y)$$

Logistic 成長，頁 II

微分方程

何震邦

微分方程

一階 ODE

線性

變數可分離

恰當-積分乘數

伯努力

齊次

幾乎線性

含線性分式

以 $t^n x$ 替代

既然我們要求 $y(3)$ ，我們就從 $t = 0$ 積到 $t = 3$ 。

$$\int_{y(0)}^{y(3)} \frac{10000}{3y(2000-y)} dy = \int_0^3 dt$$
$$\int_{800}^{y(3)} \frac{5}{3} \left(\frac{1}{y} - \frac{1}{y-2000} \right) dy = 3.$$

此時被積函數有 0 和 2000 兩個不連續點，所以有效區間為 $(0, 2000)$ 。

$$\ln(y(3)) - \ln(800) - \ln(2000 - y(3)) + \ln(1200) = \frac{9}{5}$$

Logistic 成長，頁 III

微分方程

何震邦

微分方程

一階 ODE

線性

變數可分離

恰當-積分乘數

伯努利

齊次

幾乎線性

含線性分式

以 $t^n x$ 替代

$$\ln\left(\frac{y(3)}{2000 - y(3)}\right) = \frac{9}{5} + \ln\left(\frac{2}{3}\right)$$

$$\frac{y(3)}{2000 - y(3)} = \frac{2e^{9/5}}{3}$$

$$\frac{2000}{2000 - y(3)} = \frac{2e^{9/5}}{3} + 1$$

$$y(3) = \frac{4000e^{9/5}}{2e^{9/5} + 3} \approx 1602.6304520653167546.$$

方法 3：恰當微分方程

微分方程

何震邦

微分方程

一階 ODE

線性

變數可分離

恰當-積分乘數

伯努力

齊次

幾乎線性

含線性分式

以 $t^n x$ 替代

Theorem

給定微分方程

$$P(x, t) x' + Q(x, t) = 0$$

其中

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial Q}{\partial x}.$$

通解為勢函數

$$F(x, t) = \int Q dt + \int \left(P - \frac{\partial}{\partial x} \int Q dt \right) dx.$$

勢函數的存在

微分方程

何震邦

微分方程

一階 ODE

線性

變數可分離

恰當-積分乘數

伯努力

齊次

幾乎線性

含線性分式

以 $t^n x$ 替代

Proof.

設有函數 $F(x, t)$ 使得

$$\frac{\partial F}{\partial x} = P \quad \text{且} \quad \frac{\partial F}{\partial t} = Q.$$

此時若 P, Q, P_t 與 Q_x 在所討論的 xt -平面區域上連續，則在此區域中由二階導數的對稱性得

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \frac{\partial F}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial F}{\partial t} = \frac{\partial Q}{\partial x}.$$



通解的證明

微分方程

何震邦

微分方程

一階 ODE

線性

變數可分離

恰當-積分乘數

伯努力

齊次

幾乎線性

含線性分式

以 $t^n x$ 替代

Proof.

設

$$F = \int Q dt + \int \left(P - \frac{\partial}{\partial x} \int Q dt \right) dx.$$

$$\frac{\partial F}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \int Q dt + P - \frac{\partial}{\partial x} \int Q dt = P.$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial F}{\partial t} &= Q + \frac{\partial}{\partial t} \int \left(P - \frac{\partial}{\partial x} \int Q dt \right) dx \\ &= Q + \int \left(\frac{\partial P}{\partial t} - \frac{\partial Q}{\partial x} \right) dx = Q. \end{aligned}$$



積分乘數

微分方程

何震邦

微分方程

一階 ODE

線性

變數可分離

恰當-積分乘數

伯努力

齊次

幾乎線性

含線性分式

以 $t^n x$ 替代

對於非恰當微分方程

$$P(x, t) x' + Q(x, t) = 0$$

我們可以試著尋找積分乘數 $\mu(x, t)$ 使得

$$\mu P x' + \mu Q = 0$$

為恰當微分方程，即

$$\frac{\partial}{\partial t} \mu P = \frac{\partial}{\partial x} \mu Q \quad (5)$$

其中 $\mu \neq 0$ 。

積分乘數為單變函數

微分方程

何震邦

微分方程

一階 ODE

線性

變數可分離

恰當-積分乘數

伯努力

齊次

幾乎線性

含線性分式

以 $t^n x$ 替代

Theorem

給定非恰當微分方程

$$P(x, t)x' + Q(x, t) = 0. \quad (6)$$

若 $\frac{Q_x - P_t}{P} = h(t)$ ，則積分乘數為

$$\mu(t) = e^{\int h(t) dt}. \quad (7)$$

同理，若 $\frac{P_t - Q_x}{Q} = k(x)$ ，則積分乘數為

$$\mu(x) = e^{\int k(x) dx}.$$

(7)式的證明

微分方程

何震邦

微分方程

一階 ODE

線性

變數可分離

恰當-積分乘數

伯努力

齊次

幾乎線性

含線性分式

以 $t^n x$ 替代

Proof.

設 $\mu(t)$ 為(6)的積分乘數，則由(5)得

$$\mu \frac{\partial Q}{\partial x} - \mu \frac{\partial P}{\partial t} - P \frac{d\mu}{dt} = 0$$

這是變數可分離的微分方程。我們著手解 μ 。

$$\frac{\mu'}{\mu} = \frac{Q_x - P_t}{P} = h$$

$$\ln \mu = \int h dt$$

$$\mu = e^{\int h dt}.$$



P 與 Q 滿足柯西-黎曼方程時的積分乘數

微分方程

何震邦

微分方程

一階 ODE

線性

變數可分離

恰當-積分乘數

伯努力

齊次

幾乎線性

含線性分式

以 $t^n x$ 替代

Theorem

給定微分方程

$$P(x, t) x' + Q(x, t) = 0. \quad (8)$$

其中

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = \frac{\partial P}{\partial x} \quad \text{且} \quad \frac{\partial P}{\partial t} = -\frac{\partial Q}{\partial x}$$

即 P 與 Q 滿足柯西-黎曼方程，此時積分乘數為

$$\mu(x, t) = \frac{1}{P^2 + Q^2}.$$

方法 4：伯努力微分方程

微分方程

何震邦

微分方程

一階 ODE

線性

變數可分離

恰當-積分乘數

伯努力

齊次

幾乎線性

含線性分式

以 $t^n x$ 替代

Theorem

給定微分方程

$$f(x)y' + g(x)y + h(x)y^n = 0$$

其中 $n \neq 1$ 。設 $u(x) = y^{1-n}$ ，則原方程轉為線性的

$$f(x)u' + (1-n)g(x)u + (1-n)h(x) = 0.$$

齊次函數

微分方程

何震邦

微分方程

一階 ODE

線性

變數可分離

恰當-積分乘數

伯努力

齊次

幾乎線性

含線性分式

以 $t^n x$ 替代

Definition

函數 $f(x, y)$ 稱為 n 次齊次函數，等價於

$$f(tx, ty) = t^n f(x, y) \quad (9)$$

其中 n 為常數。

Example

- ▶ $f(x, y) = x^3 + 2x^2y + 3xy^2 + 4y^3$ 為 3 次齊次函數。
- ▶ $f(x, y) = x^2 + y^2 + 1$ 不是齊次函數。

方法 5：齊次微分方程

微分方程

何震邦

微分方程

一階 ODE

線性

變數可分離

恰當-積分乘數

伯努力

齊次

幾乎線性

含線性分式

以 $t^n x$ 替代

Theorem

給定微分方程

$$P(x, t)x' = Q(x, t)$$

其中 P 與 Q 皆為 x, t 的齊次函數。設 $u(t) = x/t$ ，則原方程轉為變數可分離的方程。

方法 6：幾乎線性的微分方程

微分方程

何震邦

微分方程

一階 ODE

線性

變數可分離

恰當-積分乘數

伯努力

齊次

幾乎線性

含線性分式

以 $t^n x$ 替代

Theorem

給定微分方程

$$f(t) k'(x) x' + g(t) k(x) = h(t).$$

設 $u(t) = k(x)$ ，則原方程轉為線性的

$$f(t) u' + g(t) u = h(t).$$

Remark

這方法在課本上罕見。

方法 7：含線性分式的微分方程

微分方程

何震邦

微分方程

一階 ODE

線性

變數可分離

恰當-積分乘數

伯努力

齊次

幾乎線性

含線性分式

以 $t^n x$ 替代

Theorem

給定微分方程

$$x' = f\left(\frac{a_1x + b_1t + c_1}{a_2x + b_2t + c_2}\right).$$

若 $a_1x + b_1t + c_1 = 0$ 與 $a_2x + b_2t + c_2 = 0$ 聯立方程有唯一解 $(x, t) = (h, k)$ ，設 $X = x - h$ 與 $T = t - k$ ，則原方程轉為齊次的

$$\frac{dX}{dT} = f\left(\frac{a_1X + b_1T}{a_2X + b_2T}\right).$$

方法 8：以 $t^n x$ 替代

微分方程

何震邦

微分方程

一階 ODE

線性

變數可分離

恰當-積分乘數

伯努力

齊次

幾乎線性

含線性分式

以 $t^n x$ 替代

Theorem

給定微分方程

$$x' + \frac{xf(t^n x)}{t} = 0$$

其中 n 為待定常數。設 $y = t^n x$ ，則原方程轉為變數可分離的

$$\int \frac{1}{y(n - f(y))} dy = \int \frac{1}{t} dt.$$

