



Fyziologie pod
křivkou

dume@ikem.cz

Úvod

Historie

Windkessel
model

Plocha pod
křivkou

Pulse power

Současná
technika

Fyziologie pod křivkou

Dušan Merta

KARIP, **IKEM**

16. listopadu 2012



Fyziologie pod
křivkou

dume@ikem.cz

Úvod

Historie

Windkessel
model

Plocha pod
křivkou

Pulse power

Současná
technika

Fyzika pod křivkou

Dušan Merta

KARIP, **IKEM**

16. listopadu 2012



Co nás čeká

Fyziologie pod
křivkou

dume@ikem.cz

Úvod

Historie

Windkessel
model

Plocha pod
křivkou

Pulse power

Současná
technika

- 1 Úvod
- 2 Historie
- 3 Windkessel model
- 4 Plocha pod křivkou
- 5 Analýza tepové energie
- 6 Současná technika





Úvod

Proč je analýza tlakové křivky důležitá?

Fyziologie pod
křivkou

dume@ikem.cz

Úvod

Historie

Windkessel
model

Plocha pod
křivkou

Pulse power

Současná
technika

Je to cesta od **tlaku** k **průtoku**!

- tlaková křivka → průtok (tepový objem) → **srdeční výdej**
- invazivní měření krevního tlaku je technicky zvládnutá metoda
- většina pacientů v intenzivní péči má arteriální katetr
- *pseudoneinvazivní metoda*



Úvod

Proč je analýza tlakové křivky důležitá?

Fyziologie pod
křivkou

dume@ikem.cz

Úvod

Historie

Windkessel
model

Plocha pod
křivkou

Pulse power

Současná
technika

Je to cesta od **tlaku** k **průtoku**!

- tlaková křivka → průtok (tepový objem) → **srdeční výdej**
- invazivní měření krevního tlaku je technicky zvládnutá metoda

- většina pacientů v intenzivní péči má arteriální katetr
- *pseudoneinvazivní* metoda



Fyziologie pod křivkou

dume@ikem.cz

Úvod

Historie

Windkessel model

Plocha pod křivkou

Pulse power

Současná technika





Fyziologie pod křivkou

dume@ikem.cz

Úvod

Historie

Windkessel
model

Plocha pod
křivkou

Pulse power

Současná
technika





Fyziologie pod
křivkou

dume@ikem.cz

Úvod

Historie

Windkessel
model

Plocha pod
křivkou

Pulse power

Současná
technika





Fyziologie pod
křivkou

dume@ikem.cz

Úvod

Historie

Windkessel
model

Plocha pod
křivkou

Pulse power

Současná
technika





Historie

Fyziologie pod
křivkou

dume@ikem.cz

Úvod

Historie

Windkessel
model

Plocha pod
křivkou

Pulse power

Současná
technika



STEPHEN HALES (1677 – 1761)

- **1733** – přímé měření TK (Stephen Hales)
- **1899** – *Windkessel* model cirkulace (Otto Frank)
- **1904** – tepový objem je úměrný tlakové amplitudě (Erlanger & Hooker)
- **1904** – nutnost kalibrace nezávislou metodou měření CO (Wezler & Bogler)



Historie

Fyziologie pod
křivkou

dume@ikem.cz

Úvod

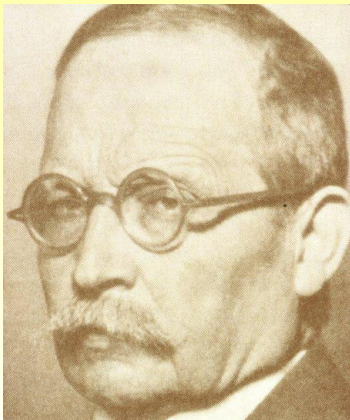
Historie

Windkessel
model

Plocha pod
křivkou

Pulse power

Současná
technika



OTTO FRANK (1865 – 1944)

- **1733** – přímé měření TK (Stephen Hales)
- **1899** – *Windkessel* model cirkulace (Otto Frank)
- **1904** – tepový objem je úměrný tlakové amplitudě (Erlanger & Hooker)
- **1904** – nutnost kalibrace nezávislou metodou měření CO (Wezler & Bogler)



Historie

Fyziologie pod
křivkou

dume@ikem.cz

Úvod

Historie

Windkessel
model

Plocha pod
křivkou

Pulse power

Současná
technika



J. ERLANGER (1874 – 1965)

- **1733** – přímé měření TK (Stephen Hales)
- **1899** – *Windkessel* model cirkulace (Otto Frank)
- **1904** – tepový objem je úměrný tlakové amplitudě (Erlanger & Hooker)
- **1904** – nutnost kalibrace nezávislou metodou měření CO (Wezler & Bogler)



Historie

Fyziologie pod
křivkou

dume@ikem.cz

Úvod

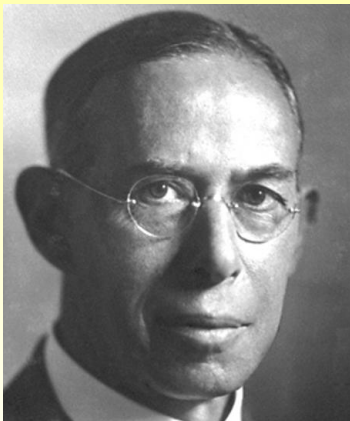
Historie

Windkessel
model

Plocha pod
křivkou

Pulse power

Současná
technika



J. ERLANGER (1874 – 1965)

- **1733** – přímé měření TK (Stephen Hales)
- **1899** – *Windkessel* model cirkulace (Otto Frank)
- **1904** – tepový objem je úměrný tlakové amplitudě (Erlanger & Hooker)
- **1904** – nutnost kalibrace nezávislou metodou měření CO (Wezler & Bogler)



Historie

Fyziologie pod
křivkou

dume@ikem.cz

Úvod

Historie

Windkessel
model

Plocha pod
křivkou

Pulse power

Současná
technika

- **1927** – jednoduchá korekce s ohledem na arteriální *compliance* (Liljestrand & Zander)
- **1948** – první reálná měření *compliance* lidské aorty
- **1970** – plocha pod systolickou částí křivky (Kouchoukos, Sheppard & McDonald) [*Circulation Research*]



Historie

Fyziologie pod
křivkou

dume@ikem.cz

Úvod

Historie

Windkessel
model

Plocha pod
křivkou

Pulse power

Současná
technika

- **1927** – jednoduchá korekce s ohledem na arteriální *compliance* (Liljestrand & Zander)
- **1948** – první reálná měření *compliance* lidské aorty
- **1970** – plocha pod systolickou částí křivky (Kouchoukos, Sheppard & McDonald) [*Circulation Research*]

Estimation of Stroke Volume in the Dog by a Pulse Contour Method

By Nicholas T. Kouchoukos, M.D., Louis C. Sheppard, B.S.,
and Donald A. McDonald, D.M., D.Sc.

ABSTRACT

A method for estimating the stroke volume (SV) from the systolic area of a single-channel record of the central aortic pressure has been tested in 12 anesthetized open-chest dogs. The formula used was $SV = K \cdot P_{sa} \cdot (1 + T_s/T_d)$, where P_{sa} is the area under the systolic part of the curve above end-diastolic pressure, T_s and T_d are the durations of systole and



Windkessel model

Fyziologie pod
křivkou

dume@ikem.cz

Úvod

Historie

Windkessel
model

Plocha pod
křivkou

Pulse power

Současná
technika

- **1899 – Otto Frank**
- tekutina je vstříknuta do uzavřené, vzduchem naplněné komory (*compliance*)
- dále odteče přes otvor ven (*rezistence*)
- analogie s hasičskou stříkačkou



Windkessel model

Fyziologie pod
křivkou

dume@ikem.cz

Úvod

Historie

Windkessel
model

Plocha pod
křivkou

Pulse power

Současná
technika

- **1899 – Otto Frank**
- tekutina je vstříknuta do uzavřené, vzduchem naplněné komory (*compliance*)
- dále odteče přes otvor ven (*rezistence*)
- analogie s hasičskou stříkačkou



Windkessel model

Fyziologie pod
křivkou

dume@ikem.cz

Úvod

Historie

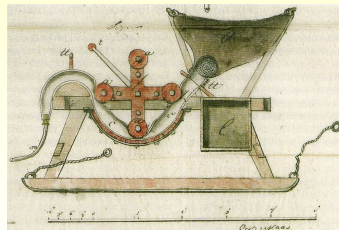
Windkessel
model

Plocha pod
křivkou

Pulse power

Současná
technika

- **1899 – Otto Frank**
- tekutina je vstříknuta do uzavřené, vzduchem naplněné komory (*compliance*)
- dále odteče přes otvor ven (*rezistence*)
- analogie s hasičskou stříkačkou





Windkessel model

Fyziologie pod křivkou

dume@ikem.cz

Úvod

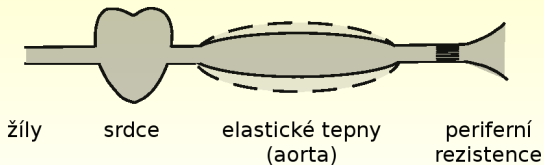
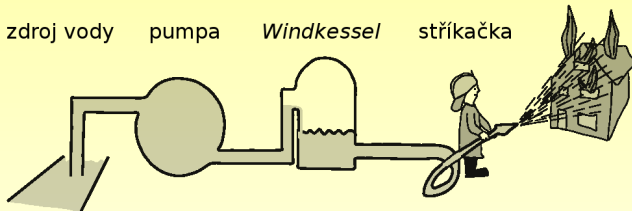
Historie

Windkessel model

Plocha pod křivkou

Pulse power

Současná technika



¹ WESTERHOF N. ET AL: The arterial Windkessel, *Med Biol Eng Comput* 2008



Windkessel model

Matematická odbočka I – derivace

Fyziologie pod
křivkou

dume@ikem.cz

Úvod

Historie

Windkessel
model

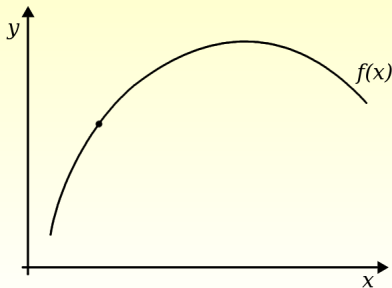
Plocha pod
křivkou

Pulse power

Současná
technika

Derivace

- „Derivace je mírou změny funkce v daném bodě.“
- Derivaci funkce f označíme f' .
- Derivace je podíl diferenciálů.



$$f'(x) \approx \frac{\Delta y}{\Delta x}$$

$$f'(x) \approx \frac{\Delta y}{\Delta x}$$

$$f'(x) = \frac{dy}{dx}$$

$\Delta x \rightarrow dx$ (diferenciál)



Windkessel model

Matematická odbočka I – derivace

Fyziologie pod
křivkou

dume@ikem.cz

Úvod

Historie

Windkessel
model

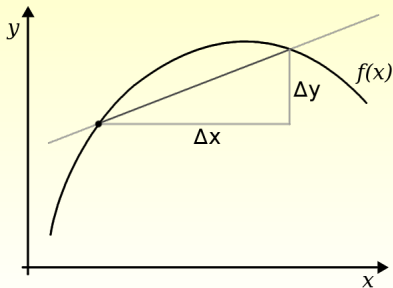
Plocha pod
křivkou

Pulse power

Současná
technika

Derivace

- „Derivace je mírou změny funkce v daném bodě.“
- Derivaci funkce f označíme f' .
- Derivace je podíl diferenciálů.



$$f'(x) \approx \frac{\Delta y}{\Delta x}$$

$$f'(x) \approx \frac{\Delta y}{\Delta x}$$

$$f'(x) = \frac{dy}{dx}$$

$\Delta x \rightarrow dx$ (diferenciál)



Windkessel model

Matematická odbočka I – derivace

Fyziologie pod
křivkou

dume@ikem.cz

Úvod

Historie

Windkessel
model

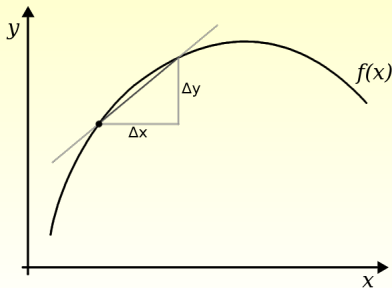
Plocha pod
křivkou

Pulse power

Současná
technika

Derivace

- „Derivace je mírou změny funkce v daném bodě.“
- Derivaci funkce f označíme f' .
- Derivace je podíl diferenciálů.



$$f'(x) \approx \frac{\Delta y}{\Delta x}$$

$$f'(x) \simeq \frac{\Delta y}{\Delta x}$$

$$f'(x) = \frac{dy}{dx}$$

$\Delta x \rightarrow dx$ (diferenciál)



Windkessel model

Matematická odbočka I – derivace

Fyziologie pod
křivkou

dume@ikem.cz

Úvod

Historie

Windkessel
model

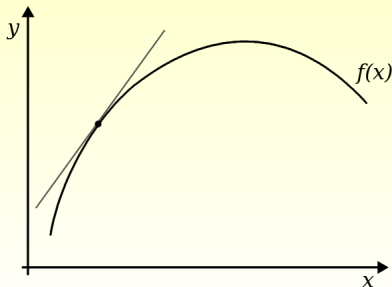
Plocha pod
křivkou

Pulse power

Současná
technika

Derivace

- „Derivace je mírou změny funkce v daném bodě.“
- Derivaci funkce f označíme f' .
- Derivace je podíl diferenciálů.



$$f'(x) \approx \frac{\Delta y}{\Delta x}$$

$$f'(x) \simeq \frac{\Delta y}{\Delta x}$$

$$f'(x) = \frac{dy}{dx}$$

$\Delta x \rightarrow dx$ (diferenciál)



Windkessel model

Matematická odbočka I – derivace

Fyziologie pod
křivkou

dume@ikem.cz

Úvod

Historie

Windkessel
model

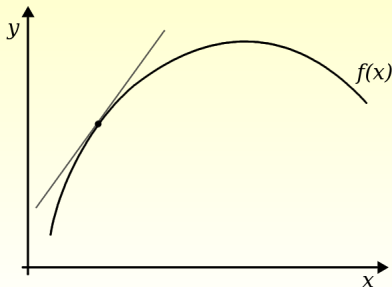
Plocha pod
křivkou

Pulse power

Současná
technika

Derivace

- „Derivace je mírou změny funkce v daném bodě.“
- Derivaci funkce f označíme f' .
- Derivace je podíl diferenciálů.



$$f'(x) \approx \frac{\Delta y}{\Delta x}$$

$$f'(x) \simeq \frac{\Delta y}{\Delta x}$$

$$f'(x) = \frac{dy}{dx}$$

$\Delta x \rightarrow dx$ (diferenciál)



Windkessel model

Matematická odbočka I – derivace

Fyziologie pod
křivkou

dume@ikem.cz

Úvod

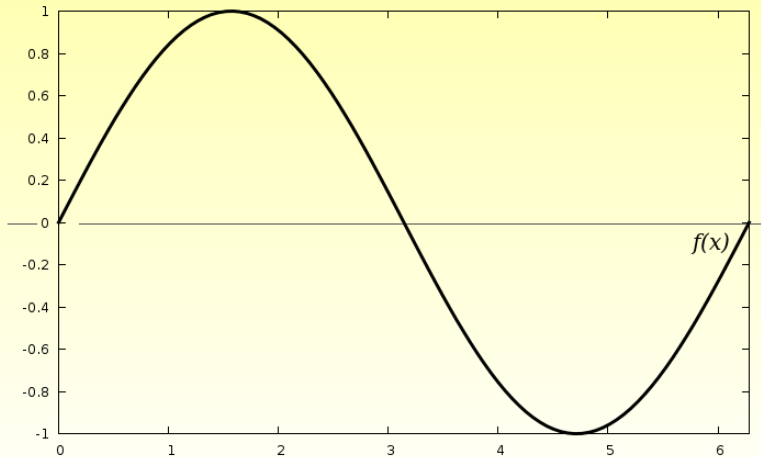
Historie

Windkessel
model

Plocha pod
křivkou

Pulse power

Současná
technika





Windkessel model

Matematická odbočka I – derivace

Fyziologie pod
křivkou

dume@ikem.cz

Úvod

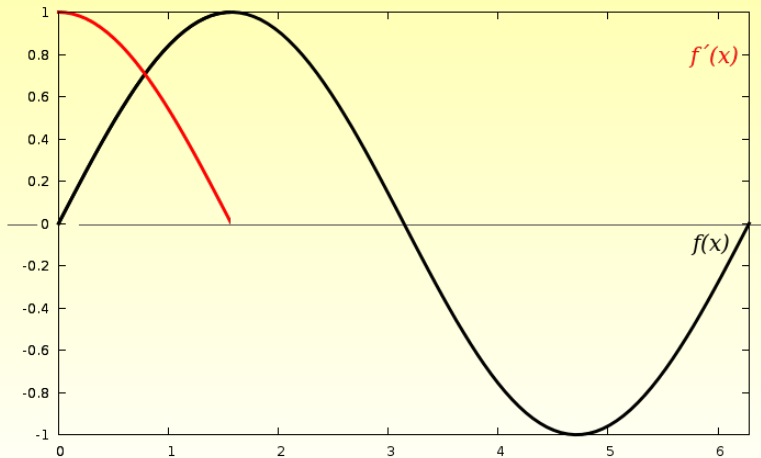
Historie

Windkessel
model

Plocha pod
křivkou

Pulse power

Současná
technika





Windkessel model

Matematická odbočka I – derivace

Fyziologie pod
křivkou

dume@ikem.cz

Úvod

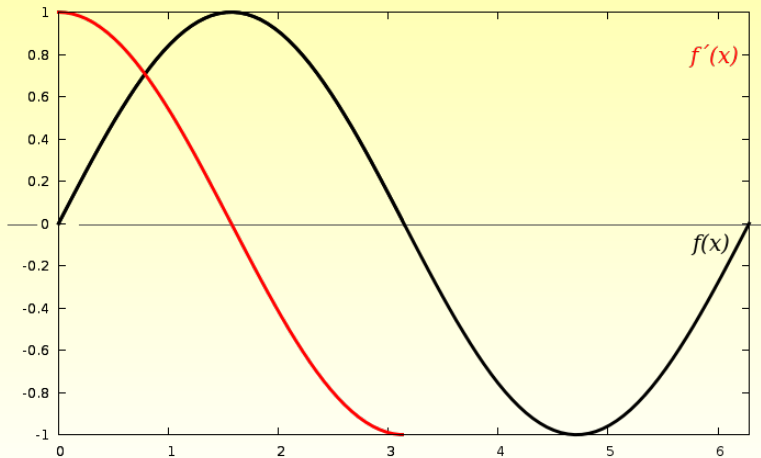
Historie

Windkessel
model

Plocha pod
křivkou

Pulse power

Současná
technika





Windkessel model

Matematická odbočka I – derivace

Fyziologie pod
křivkou

dume@ikem.cz

Úvod

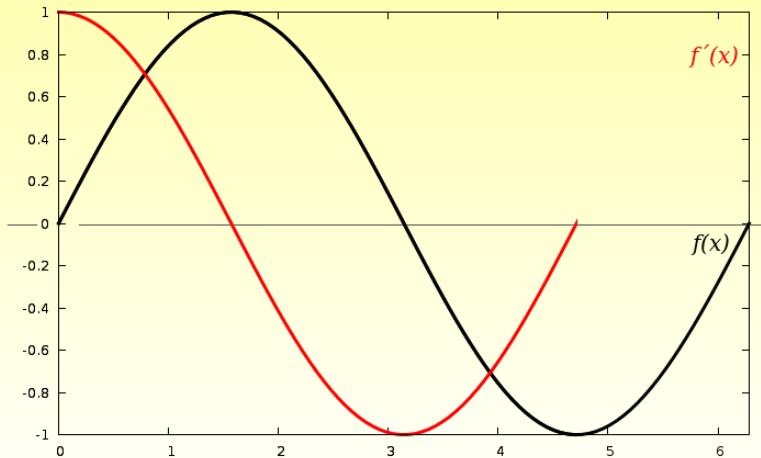
Historie

Windkessel
model

Plocha pod
křivkou

Pulse power

Současná
technika





Windkessel model

Matematická odbočka I – derivace

Fyziologie pod
křivkou

dume@ikem.cz

Úvod

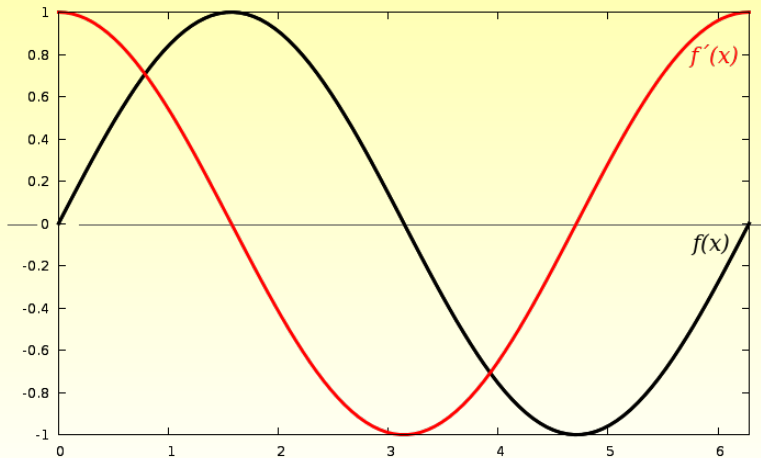
Historie

Windkessel
model

Plocha pod
křivkou

Pulse power

Současná
technika





Windkessel model

Analýza diastolické části

Fyziologie pod
křivkou

dume@ikem.cz

Úvod

Historie

Windkessel
model

Plocha pod
křivkou

Pulse power

Současná
technika

Předpoklady

- Compliance je konstantní: $\frac{dV}{dP} = C$
- Tok se řídí podle *Hagen-Poiseuillova* zákona:

$$\dot{Q} = \frac{dV}{dt} = \Delta P \cdot \frac{\pi}{8} \cdot \frac{1}{\eta} \cdot \frac{R^4}{L}$$

$$\frac{dP}{dV} = \frac{1}{C} \quad \frac{dV}{dt} = -\frac{P}{\omega}$$

$$\frac{1}{P} \cdot dP = -\frac{1}{C\omega} \cdot dt$$



Windkessel model

Analýza diastolické části

Fyziologie pod
křivkou

dume@ikem.cz

Úvod

Historie

Windkessel
model

Plocha pod
křivkou

Pulse power

Současná
technika

Předpoklady

- Compliance je konstantní: $\frac{dV}{dP} = C$
- Tok se řídí podle *Hagen-Poiseuillova* zákona:

$$\dot{Q} = \frac{dV}{dt} = \Delta P \cdot \frac{\pi}{8} \cdot \frac{1}{\eta} \cdot \frac{R^4}{L}$$

$$\frac{dP}{dV} = \frac{1}{C} \quad \frac{dV}{dt} = -\frac{P}{\omega}$$

$$\frac{1}{P} \cdot dP = -\frac{1}{C\omega} \cdot dt$$



Windkessel model

Analýza diastolické části

Fyziologie pod
křivkou

dume@ikem.cz

Úvod

Historie

Windkessel
model

Plocha pod
křivkou

Pulse power

Současná
technika

Předpoklady

- Compliance je konstantní: $\frac{dV}{dP} = C$
- Tok se řídí podle *Hagen-Poiseuillova* zákona:

$$\dot{Q} = \frac{dV}{dt} = \Delta P \cdot \frac{\pi}{8} \cdot \frac{1}{\eta} \cdot \frac{R^4}{L}$$

$$\frac{dP}{dV} = \frac{1}{C} \quad \frac{dV}{dt} = -\frac{P}{\omega}$$

$$\frac{1}{P} \cdot dP = -\frac{1}{C\omega} \cdot dt$$



Windkessel model

Analýza diastolické části

Fyziologie pod
křivkou

dume@ikem.cz

Úvod

Historie

Windkessel
model

Plocha pod
křivkou

Pulse power

Současná
technika

Předpoklady

- Compliance je konstantní: $\frac{dV}{dP} = C$
- Tok se řídí podle *Hagen-Poiseuillova* zákona:

$$\dot{Q} = \frac{dV}{dt} = \Delta P \cdot \frac{\pi}{8} \cdot \frac{1}{\eta} \cdot \frac{R^4}{L}$$

$$\frac{dP}{dV} = \frac{1}{C} \quad \frac{dV}{dt} = -\frac{P}{\omega}$$

$$\frac{1}{P} \cdot dP = -\frac{1}{C\omega} \cdot dt$$



Windkessel model

Analýza diastolické části

Fyziologie pod
křivkou

dume@ikem.cz

Úvod

Historie

Windkessel
model

Plocha pod
křivkou

Pulse power

Současná
technika

Předpoklady

- Compliance je konstantní: $\frac{dV}{dP} = C$
- Tok se řídí podle *Hagen-Poiseuillova* zákona:

$$\dot{Q} = \frac{dV}{dt} = \Delta P \cdot \frac{\pi}{8} \cdot \frac{1}{\eta} \cdot \frac{R^4}{L}$$

$$\frac{dP}{dV} = \frac{1}{C} \quad \frac{dV}{dt} = -\frac{P}{\omega}$$

$$\frac{1}{P} \cdot dP = -\frac{1}{C\omega} \cdot dt$$



Windkessel model

Analýza diastolické části – obecný případ

Fyziologie pod
křivkou

dume@ikem.cz

Úvod

Historie

Windkessel
model

Plocha pod
křivkou

Pulse power

Současná
technika

Compliance i tok jsou obecnou funkcí tlaku:

$$\frac{dP}{dV} = f(P) \quad \frac{dV}{dt} = -\varphi(P)$$

$$dV = \frac{dP}{f(P)}$$

$$\frac{1}{f(P)} \cdot \frac{dP}{dt} = -\varphi(P)$$



Windkessel model

Analýza diastolické části – obecný případ

Fyziologie pod
křivkou

dume@ikem.cz

Úvod

Historie

Windkessel
model

Plocha pod
křivkou

Pulse power

Současná
technika

Compliance i tok jsou obecnou funkcí tlaku:

$$\frac{dP}{dV} = f(P) \quad \frac{dV}{dt} = -\varphi(P)$$

$$dV = \frac{dP}{f(P)}$$

$$\frac{1}{f(P)} \cdot \frac{dP}{dt} = -\varphi(P)$$



Windkessel model

Analýza systolické části

Fyziologie pod
křivkou

dume@ikem.cz

Úvod

Historie

Windkessel
model

Plocha pod
křivkou

Pulse power

Současná
technika

Předpoklady

- Tok do systému za časový interval dt : $dV = i \cdot dt$
- Compliance je funkcí tlaku:

$$\frac{dP}{dV} = f(P) \quad \rightarrow \quad dV_C = \frac{dP}{f(P)}$$

- Tok je funkcí tlaku:

$$\frac{dV}{dt} = \varphi(P) \quad \rightarrow \quad dV_F = \varphi(P) \cdot dt$$

$$dV = dV_C + dV_F$$



Windkessel model

Analýza systolické části

Fyziologie pod
křivkou

dume@ikem.cz

Úvod

Historie

Windkessel
model

Plocha pod
křivkou

Pulse power

Současná
technika

Předpoklady

- Tok do systému za časový interval dt : $dV = i \cdot dt$
- Compliance je funkcí tlaku:

$$\frac{dP}{dV} = f(P) \quad \rightarrow \quad dV_C = \frac{dP}{f(P)}$$

- Tok je funkcí tlaku:

$$\frac{dV}{dt} = \varphi(P) \quad \rightarrow \quad dV_F = \varphi(P) \cdot dt$$

$$dV = dV_C + dV_F$$



Windkessel model

Analýza systolické části

Fyziologie pod
křivkou

dume@ikem.cz

Úvod

Historie

Windkessel
model

Plocha pod
křivkou

Pulse power

Současná
technika

Předpoklady

- Tok do systému za časový interval dt : $dV = i \cdot dt$
- Compliance je funkcí tlaku:

$$\frac{dP}{dV} = f(P) \quad \rightarrow \quad dV_C = \frac{dP}{f(P)}$$

- Tok je funkcí tlaku:

$$\frac{dV}{dt} = \varphi(P) \quad \rightarrow \quad dV_F = \varphi(P) \cdot dt$$

$$dV = dV_C + dV_F$$



Windkessel model

Analýza systolické části

Fyziologie pod
křivkou

dume@ikem.cz

Úvod

Historie

Windkessel
model

Plocha pod
křivkou

Pulse power

Současná
technika

$$dV = i \cdot dt \quad dV_C = \frac{dP}{f(P)} \quad dV_F = \varphi(P) \cdot dt$$

$$dV = dV_C + dV_F$$

$$i \cdot dt = \frac{dP}{f(P)} + \varphi(P) \cdot dt$$

$$i = \frac{1}{f(P)} \cdot \frac{dP}{dt} + \varphi(P)$$



Windkessel model

Analýza systolické části

Fyziologie pod
křivkou

dume@ikem.cz

Úvod

Historie

Windkessel
model

Plocha pod
křivkou

Pulse power

Současná
technika

$$dV = i \cdot dt \quad dV_C = \frac{dP}{f(P)} \quad dV_F = \varphi(P) \cdot dt$$

$$dV = dV_C + dV_F$$

$$i \cdot dt = \frac{dP}{f(P)} + \varphi(P) \cdot dt$$

$$i = \frac{1}{f(P)} \cdot \frac{dP}{dt} + \varphi(P)$$



Windkessel model

Fyziologie pod
křivkou

dume@ikem.cz

Úvod

Historie

Windkessel
model

Plocha pod
křivkou

Pulse power

Současná
technika

Systola

$$i = \frac{1}{f(P)} \cdot \frac{dP}{dt} + \varphi(P)$$

Diastola

$$\frac{1}{f(P)} \cdot \frac{dP}{dt} = -\varphi(P)$$

$$i = \frac{1}{f(P)} \left[\left(\frac{dP}{dt} \right)_S - \left(\frac{dP}{dt} \right)_D \right]$$



Windkessel model

Fyziologie pod
křivkou

dume@ikem.cz

Úvod

Historie

Windkessel
model

Plocha pod
křivkou

Pulse power

Současná
technika

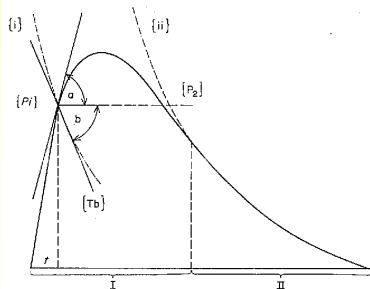
Systola

$$i = \frac{1}{f(P)} \cdot \frac{dP}{dt} + \varphi(P)$$

Diastola

$$\frac{1}{f(P)} \cdot \frac{dP}{dt} = -\varphi(P)$$

$$i = \frac{1}{f(P)} \left[\left(\frac{dP}{dt} \right)_S - \left(\frac{dP}{dt} \right)_D \right]$$





Windkessel model

Omezení

Fyziologie pod
křivkou

dume@ikem.cz

Úvod

Historie

Windkessel
model

Plocha pod
křivkou

Pulse power

Současná
technika

- dobře popisuje jen diastolickou část
- dikrotický zářez vůbec neřeší
- předpokládá pulz jako přechodný fenomén na systému, který je jinak v klidu
 - jiný přístup: periodický fenomén a *steady-state* oscilace → vlnová rovnice
- i velké cévy mají rezistenci a i arterioly mají compliance → nelze zcela oddělit kompartmenty



Windkessel model

Souvislost s RLC obvody

Fyziologie pod
křivkou

dume@ikem.cz

Úvod

Historie

Windkessel
model

Plocha pod
křivkou

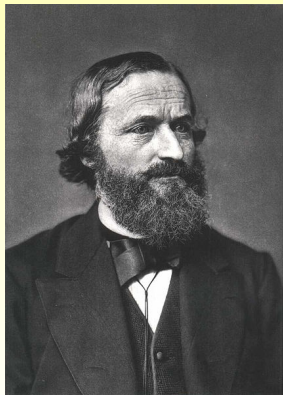
Pulse power

Současná
technika

- formálně stejný popis, jako jednoduchý obvod s kondenzátorem a rezistorem

Kirchhoffovy zákony (1847)

- 1 Součet proudů do uzlu vstupujících je roven součtu proudů vystupujících.
- 2 Součet úbytků napětí na rezistorech ve smyčce se rovná součtu napětí zdrojů.



G. R. KIRCHHOFF (1824 – 1887)



Windkessel model

Souvislost s RLC obvody

Fyziologie pod křivkou

dume@ikem.cz

Úvod

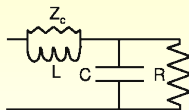
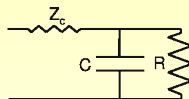
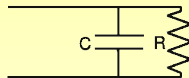
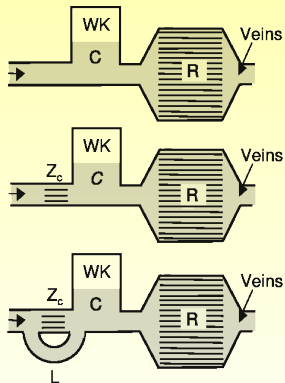
Historie

Windkessel model

Plocha pod křivkou

Pulse power

Současná technika



¹ OTTO FRANK: The Basic Shape of the Arterial Pulse. First Treatise: Mathematical Analysis



Placha pod křivkou

Fyziologie pod
křivkou

dume@ikem.cz

Úvod

Historie

Windkessel
model

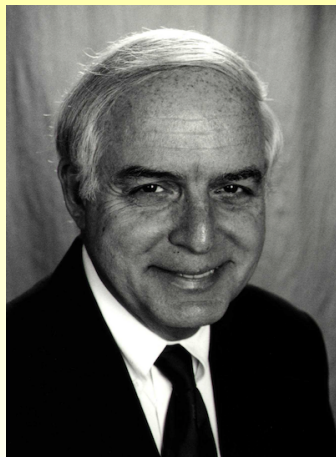
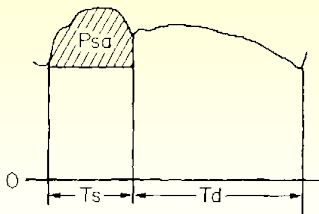
Placha pod
křivkou

Pulse power

Současná
technika

- **1970 – Nicholas Kouchoukos**
- experiment na psech
- měření v ascendentní aortě

$$SV = K \cdot P_{sa} \cdot \left(1 + \frac{T_s}{T_D} \right)$$



¹ KOUCHOUKOS N. ET AL: Estimation of Stroke Volume in the Dog by a Pulse Contour Method



Placha pod křivkou

Matematická odbočka II – určitý integrál

Fyziologie pod křivkou

dume@ikem.cz

Úvod

Historie

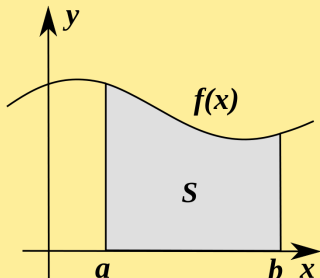
Windkessel model

Placha pod křivkou

Pulse power

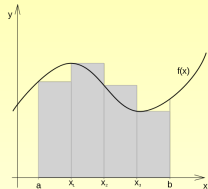
Současná technika

Určitý integrál

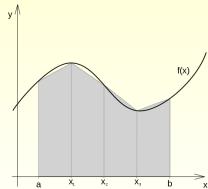


$$S = \int_a^b f(x) dx$$

● Obdelníková metoda



● Lichoběžníková metoda





Plocha pod křivkou

Princip metody

Fyziologie pod
křivkou

dume@ikem.cz

Úvod

Historie

Windkessel
model

Plocha pod
křivkou

Pulse power

Současná
technika

$$Z = \frac{P}{\dot{Q}} = \frac{\rho c}{\pi R^2 \sqrt{(1 - \sigma^2)}} \cdot \frac{1}{\sqrt{M'_{1,0}}}$$

$$\dot{Q} = P \cdot \frac{\pi R^2}{c} \cdot \frac{\sqrt{(1 - \sigma^2)}}{\rho}$$

$$SV = \int_{T_s} \dot{Q} dt$$

$$SV = \frac{\pi R^2}{c} \cdot \frac{\sqrt{(1 - \sigma^2)}}{\rho} \cdot \int_{T_s} P dt$$

$$SV = K \cdot P_{SA}$$



Plocha pod křivkou

Princip metody

Fyziologie pod
křivkou

dume@ikem.cz

Úvod

Historie

Windkessel
model

Plocha pod
křivkou

Pulse power

Současná
technika

$$Z = \frac{P}{\dot{Q}} = \frac{\rho c}{\pi R^2 \sqrt{(1 - \sigma^2)}} \cdot \frac{1}{\sqrt{M'_{1,0}}}$$

$$\dot{Q} = P \cdot \frac{\pi R^2}{c} \cdot \frac{\sqrt{(1 - \sigma^2)}}{\rho}$$

$$SV = \int_{T_s} \dot{Q} dt$$

$$SV = \frac{\pi R^2}{c} \cdot \frac{\sqrt{(1 - \sigma^2)}}{\rho} \cdot \int_{T_s} P dt$$

$$SV = K \cdot P_{SA}$$



Plocha pod křivkou

Princip metody

Fyziologie pod
křivkou

dume@ikem.cz

Úvod

Historie

Windkessel
model

Plocha pod
křivkou

Pulse power

Současná
technika

$$Z = \frac{P}{\dot{Q}} = \frac{\rho c}{\pi R^2 \sqrt{(1 - \sigma^2)}} \cdot \frac{1}{\sqrt{M'_{1,0}}}$$

$$\dot{Q} = P \cdot \frac{\pi R^2}{c} \cdot \frac{\sqrt{(1 - \sigma^2)}}{\rho}$$

$$SV = \int_{T_s} \dot{Q} dt$$

$$SV = \frac{\pi R^2}{c} \cdot \frac{\sqrt{(1 - \sigma^2)}}{\rho} \cdot \int_{T_s} P dt$$

$$SV = K \cdot P_{SA}$$



Plocha pod křivkou

Princip metody

Fyziologie pod
křivkou

dume@ikem.cz

Úvod

Historie

Windkessel
model

Plocha pod
křivkou

Pulse power

Současná
technika

$$Z = \frac{P}{\dot{Q}} = \frac{\rho c}{\pi R^2 \sqrt{(1 - \sigma^2)}} \cdot \frac{1}{\sqrt{M'_{1,0}}}$$

$$\dot{Q} = P \cdot \frac{\pi R^2}{c} \cdot \frac{\sqrt{(1 - \sigma^2)}}{\rho}$$

$$SV = \int_{T_s} \dot{Q} dt$$

$$SV = \frac{\pi R^2}{c} \cdot \frac{\sqrt{(1 - \sigma^2)}}{\rho} \cdot \int_{T_s} P dt$$

$$SV = K \cdot P_{SA}$$



Plocha pod křivkou

Princip metody

Fyziologie pod
křivkou

dume@ikem.cz

Úvod

Historie

Windkessel
model

Plocha pod
křivkou

Pulse power

Současná
technika

$$Z = \frac{P}{\dot{Q}} = \frac{\rho c}{\pi R^2 \sqrt{(1 - \sigma^2)}} \cdot \frac{1}{\sqrt{M'_{1,0}}}$$

$$\dot{Q} = P \cdot \frac{\pi R^2}{c} \cdot \frac{\sqrt{(1 - \sigma^2)}}{\rho}$$

$$SV = \int_{T_s} \dot{Q} dt$$

$$SV = \frac{\pi R^2}{c} \cdot \frac{\sqrt{(1 - \sigma^2)}}{\rho} \cdot \int_{T_s} P dt$$

$$SV = K \cdot P_{SA}$$



Plocha pod křivkou

Princip metody

Fyziologie pod
křivkou

dume@ikem.cz

Úvod

Historie

Windkessel
model

Plocha pod
křivkou

Pulse power

Současná
technika

$$Z = \frac{P}{\dot{Q}} = \frac{\rho c}{\pi R^2 \sqrt{(1 - \sigma^2)}} \cdot \frac{1}{\sqrt{M'_{1,0}}}$$

$$\dot{Q} = P \cdot \frac{\pi R^2}{c} \cdot \frac{\sqrt{(1 - \sigma^2)}}{\rho}$$

$$SV = \int_{T_s} \dot{Q} dt$$

$$SV = \frac{\pi R^2}{c} \cdot \frac{\sqrt{(1 - \sigma^2)}}{\rho} \cdot \int_{T_s} P dt$$

$$SV = K \cdot P_{SA}$$



Plocha pod křivkou

Princip metody

Fyziologie pod
křivkou

dume@ikem.cz

Úvod

Historie

Windkessel
model

Plocha pod
křivkou

Pulse power

Současná
technika

$$Z = \frac{P}{\dot{Q}} = \frac{\rho c}{\pi R^2 \sqrt{(1 - \sigma^2)}} \cdot \frac{1}{\sqrt{M'_{1,0}}}$$

$$\dot{Q} = P \cdot \frac{\pi R^2}{c} \cdot \frac{\sqrt{(1 - \sigma^2)}}{\rho}$$

$$SV = \int_{T_s} \dot{Q} dt$$

$$SV = \frac{\pi R^2}{c} \cdot \frac{\sqrt{(1 - \sigma^2)}}{\rho} \cdot \int_{T_s} P dt$$

$$SV = K \cdot P_{SA}$$



Plocha pod křivkou

Princip metody

Fyziologie pod křivkou

dume@ikem.cz

Úvod

Historie

Windkessel model

Plocha pod křivkou

Pulse power

Současná technika

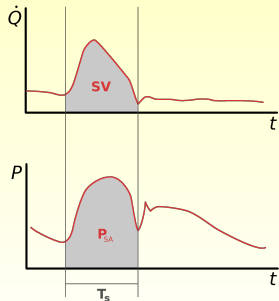
$$Z = \frac{P}{\dot{Q}} = \frac{\rho c}{\pi R^2 \sqrt{(1 - \sigma^2)}} \cdot \frac{1}{\sqrt{M'_{1,0}}}$$

$$\dot{Q} = P \cdot \frac{\pi R^2}{c} \cdot \frac{\sqrt{(1 - \sigma^2)}}{\rho}$$

$$SV = \int_{T_s} \dot{Q} dt$$

$$SV = \frac{\pi R^2}{c} \cdot \frac{\sqrt{(1 - \sigma^2)}}{\rho} \cdot \int_{T_s} P dt$$

$$SV = K \cdot P_{SA}$$





Plocha pod křivkou

Princip metody

Fyziologie pod křivkou

dume@ikem.cz

Úvod

Historie

Windkessel model

Plocha pod křivkou

Pulse power

Současná technika

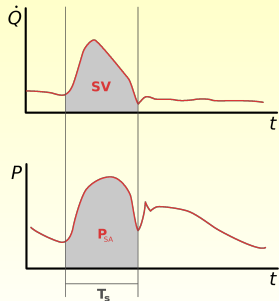
$$Z = \frac{P}{\dot{Q}} = \frac{\rho c}{\pi R^2 \sqrt{(1 - \sigma^2)}} \cdot \frac{1}{\sqrt{M'_{1,0}}}$$

$$\dot{Q} = P \cdot \frac{\pi R^2}{c} \cdot \frac{\sqrt{(1 - \sigma^2)}}{\rho}$$

$$SV = \int_{T_s} \dot{Q} dt$$

$$SV = \frac{\pi R^2}{c} \cdot \frac{\sqrt{(1 - \sigma^2)}}{\rho} \cdot \int_{T_s} P dt$$

$$SV = K \cdot P_{SA}$$





Plocha pod křivkou

Princip metody

Fyziologie pod křivkou

dume@ikem.cz

Úvod

Historie

Windkessel model

Plocha pod křivkou

Pulse power

Současná technika

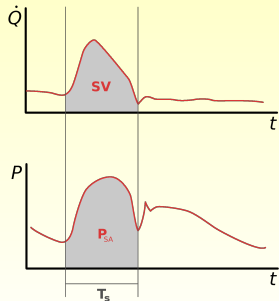
$$Z = \frac{P}{\dot{Q}} = \frac{\rho c}{\pi R^2 \sqrt{(1 - \sigma^2)}} \cdot \frac{1}{\sqrt{M'_{1,0}}}$$

$$\dot{Q} = P \cdot \frac{\pi R^2}{c} \cdot \frac{\sqrt{(1 - \sigma^2)}}{\rho}$$

$$SV = \int_{T_s} \dot{Q} dt$$

$$SV = \frac{\pi R^2}{c} \cdot \frac{\sqrt{(1 - \sigma^2)}}{\rho} \cdot \int_{T_s} P dt$$

$$SV = K \cdot P_{SA}$$





Analýza tepové energie – *pulse power analysis*

Fyziologie pod
křivkou

dume@ikem.cz

Úvod

Historie

Windkessel
model

Plocha pod
křivkou

Pulse power

Současná
technika

● 1904 – Erlanger & Hooker

- „Pulzová amplituda v aortě závisí na množství krve vypuzeném v systole.“

- $\frac{dV}{dP} = C$

● předpoklady pro praktické užití:

- znalost závislosti *compliance* cév na tlaku
- možnost kalibrace nezávislou metodou

● využití **zákona zachování hmoty a energie**

- čistá tepová energie je v rovnováze mezi *SV* a množstvím krve „ztraceným“ do periferie

$$\frac{\Delta V}{\Delta p} = c \cdot 250 \cdot e^{-k \cdot p}$$

- využití celého pulzu (nejen systoly) snižuje citlivost na pozici katetru



Analýza tepové energie – *pulse power analysis*

Fyziologie pod
křivkou

dume@ikem.cz

Úvod

Historie

Windkessel
model

Plocha pod
křivkou

Pulse power

Současná
technika

● 1904 – Erlanger & Hooker

- „Pulzová amplituda v aortě závisí na množství krve vypuzeném v systole.“

- $\frac{dV}{dP} = C$

● předpoklady pro praktické užití:

- znalost závislosti *compliance* cév na tlaku
- možnost kalibrace nezávislou metodou

● využití zákona zachování hmoty a energie

- čistá tepová energie je v rovnováze mezi *SV* a množstvím krve „ztraceným“ do periferie

$$\frac{\Delta V}{\Delta p} = c \cdot 250 \cdot e^{-k \cdot p}$$

- využití celého pulzu (nejen systoly) snižuje citlivost na pozici katetru



Analýza tepové energie – *pulse power analysis*

Fyziologie pod
křivkou

dume@ikem.cz

Úvod

Historie

Windkessel
model

Plocha pod
křivkou

Pulse power

Současná
technika

● 1904 – Erlanger & Hooker

- „Pulzová amplituda v aortě závisí na množství krve vypuzeném v systole.“

- $\frac{dV}{dP} = C$

● předpoklady pro praktické užití:

- znalost závislosti *compliance* cév na tlaku
- možnost kalibrace nezávislou metodou

● využití **zákona zachování hmoty a energie**

- čistá tepová energie je v rovnováze mezi *SV* a množstvím krve „ztraceným“ do periferie

$$\frac{\Delta V}{\Delta p} = c \cdot 250 \cdot e^{-k \cdot p}$$

- využití celého pulzu (nejen systoly) snižuje citlivost na pozici katetru



Analýza tepové energie – *pulse power analysis*

Fyziologie pod
křivkou

dume@ikem.cz

Úvod

Historie

Windkessel
model

Plocha pod
křivkou

Pulse power

Současná
technika

● 1904 – Erlanger & Hooker

- „Pulzová amplituda v aortě závisí na množství krve vypuzeném v systole.“

- $\frac{dV}{dP} = C$

● předpoklady pro praktické užití:

- znalost závislosti *compliance* cév na tlaku
- možnost kalibrace nezávislou metodou

● využití **zákona zachování hmoty a energie**

- čistá tepová energie je v rovnováze mezi *SV* a množstvím krve „ztraceným“ do periferie

$$\frac{\Delta V}{\Delta p} = c \cdot 250 \cdot e^{-k \cdot p}$$

- využití celého pulzu (nejen systoly) snižuje citlivost na pozici katetru



Současná technika

Fyziologie pod křivkou

dume@ikem.cz

Úvod

Historie

Windkessel model

Plocha pod křivkou

Pulse power

Současná technika

	metoda	kalibrace	<i>Poznámka</i>
PiCCO®	<i>pulse contour</i>	transpulmonální termodiluce (TPTD)	extravaskulární plicní tekutina, velká arterie
LiDCO®	<i>pulse power</i>	transpulmonální diluce <i>LiCl</i>	nevyžaduje CŽK
LiDCO rapid®	<i>pulse power</i>	není (nahrazena normogramem)	
Vigileo®	<i>pulse power (?)</i>	není	



Hlavní odkazy

Fyziologie pod
křivkou

dume@ikem.cz

Hlavní odkazy

Ke stažení



Richard Feynman, Robert Leighton, Matthew Sands
Feynmanovy přednášky z fyziky I, II



A. Rhodes, R. Sunderland
Arterial Pulse Power Analysis: The LiDCOTM plus system



N. T. Kouchoukos, S. L. Sheppard, D. A. McDonald
Estimation of Stroke Volume in the Dog by a Pulse Contour Method
Circ. Res. 1970;26;611-623



Otto Frank
The Basic Shape of the Arterial Pulse. First Treatise: Mathematical Analysis
J. Mol. Cell. Cardiol. 22, 253-277 (1990)



N. Westerhof, J. W. Lankhaar, B. E. Westerhof
The arterial Windkessel
Mod. Biol. Eng. Comput. 2008, DOI 10.1007/s11517-008-0359-2



Thanks, Wikipedia.



Ke stažení

Fyziologie pod
křivkou

dume@ikem.cz

Hlavní odkazy

Ke stažení



<http://goo.gl/9hUy7>