



CHẨN ĐOÁN HƯ HỎNG MÁY NGHIỀN KIỂU ĐỨNG

Học đa nguồn tín hiệu, phương pháp lai vật lý và dữ liệu

Ba phần chính: **Bối cảnh và cấu tạo máy nghiền đứng, Các dạng hư hỏng phổ biến cùng hệ thống đo, Ứng dụng AI đa nguồn cho chẩn đoán**

VRM

Vertical Roller Mill

AS · ES · TW

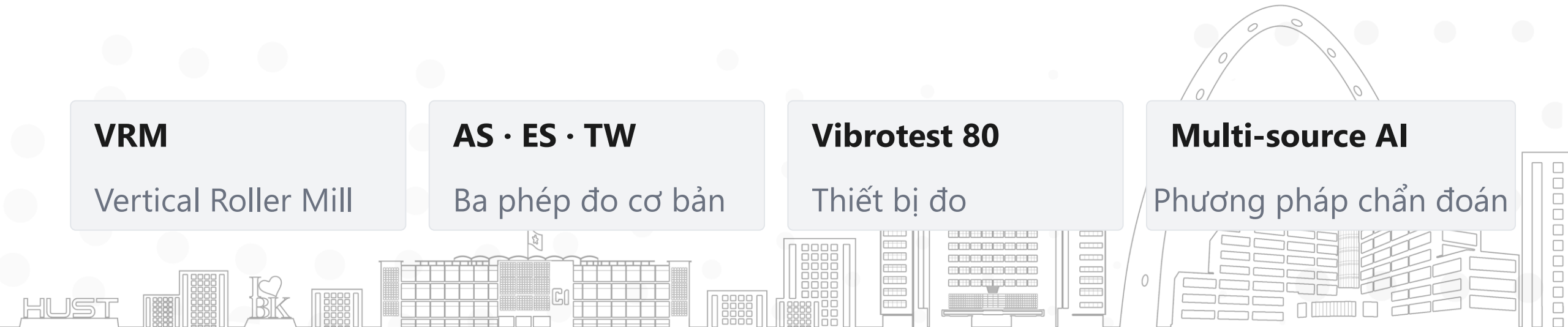
Ba phép đo cơ bản

Vibrotest 80

Thiết bị đo

Multi-source AI

Phương pháp chẩn đoán



Mục tiêu của buổi học

- 1 Hiểu cấu tạo và nguyên lý vận hành máy nghiền than kiểu đứng (VRM).
- 2 Nhận diện các dạng hư hỏng phổ biến và dải tần đặc trưng của từng cụm chi tiết.
- 3 Nắm phương pháp đo rung cho VRM: thiết bị, vị trí cảm biến, ba loại phép đo.
- 4 Phân tích được phổ tần số, envelope và time waveform để đưa ra chẩn đoán cụ thể.
- 5 Hiểu cách kết hợp đa nguồn tín hiệu và phương pháp lai vật lý cho chẩn đoán AI.

Nội dung trình bày

Bốn phần đi từ bối cảnh và cấu tạo đến chẩn đoán thực tế và ứng dụng AI.

A

Bối cảnh và cấu tạo VRM

- Vai trò trong nhà máy nhiệt điện
- Cấu tạo và nguyên lý
- Cụm chi tiết trọng yếu

B

Dạng hư hỏng & phương pháp đo

- Bản đồ hư hỏng theo cụm
- Thiết bị và bố trí điểm đo
- Ba phép đo cơ bản

C

AI đa nguồn cho chẩn đoán

- Học đa nguồn tín hiệu
- Phương pháp lai vật lý và dữ liệu
- Digital twin, domain adaptation, kiến trúc tổng thể

Vai trò của máy nghiền than trong nhà máy nhiệt điện

Một trong những tài sản trọng yếu nhất của chu trình đốt than.

20+

Nhà máy nhiệt điện than tại Việt Nam

>30%

Sản lượng điện quốc gia từ than

40%

Giảm downtime nếu áp dụng PdM (thế giới)

1650 tr.đ

Đề tài cấp Bộ về AI cho VRM, 2026-2027

Tại sao VRM quan trọng

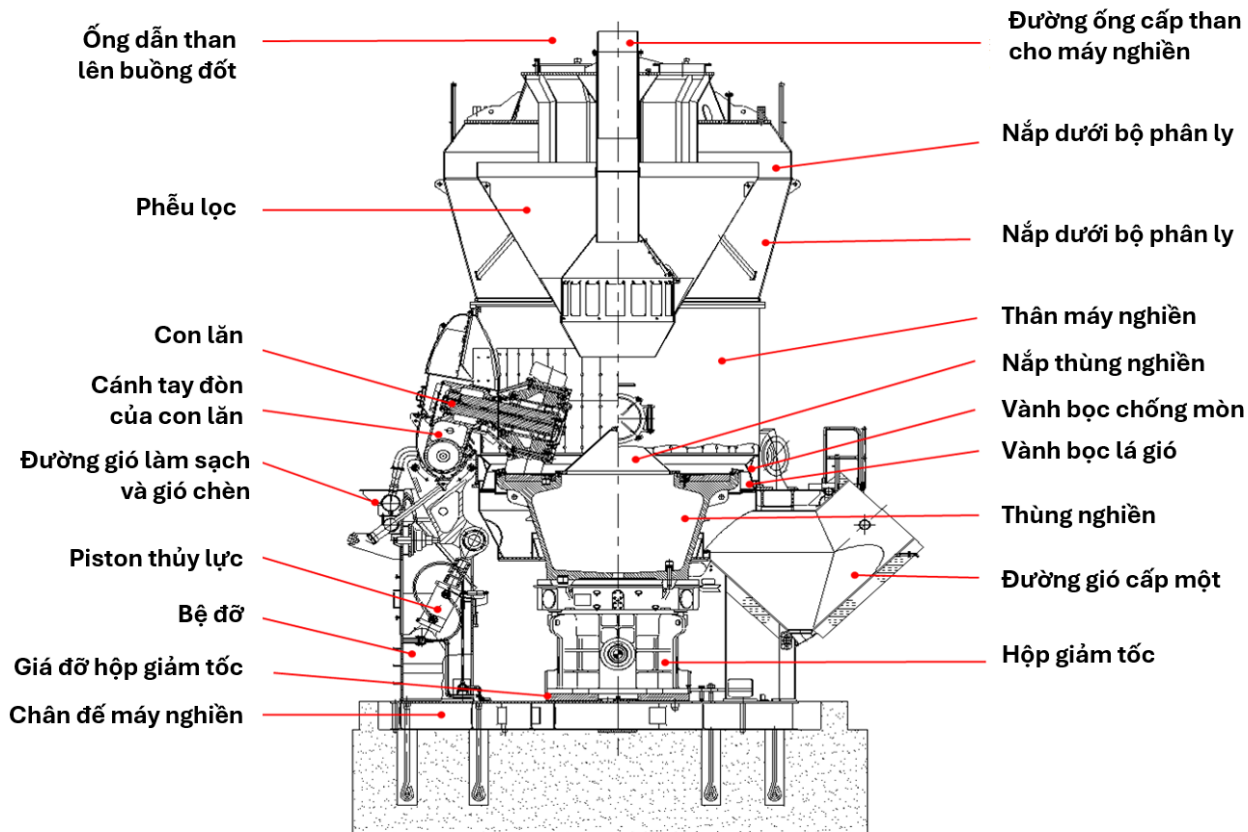
- Nghiền than thô thành bột mịn, đầu vào của lò đốt
- Một cụm tích hợp ba chức năng: nghiền, sấy, phân ly
- Hiệu suất phát điện phụ thuộc chất lượng bột than
- Tiết kiệm điện và diện tích so với máy nghiền bi truyền thống

Tại sao phải giám sát chặt

- Sự cố VRM kéo theo dừng tổ máy, mất doanh thu phát điện
- Hư hỏng cụm con lăn hay hộp số có thể lan sang lò đốt
- Đa số nhà máy đang dùng bảo trì định kỳ và sau hỏng
- Cần chuyển sang giám sát theo tình trạng, đo rung là chỉ báo mạnh nhất

Nguồn: Đề tài cấp Bộ về AI chẩn đoán máy nghiền than kiểu đứng, PGS.TS. Nguyễn Trọng Du, ĐHBK Hà Nội, 2026-2027.

Cấu tạo máy nghiền kiểu đứng



Cụm chi tiết chính

- Mâm nghiền: quay ngang, đỡ lớp than
- Con lăn: 2 đến 4 con ép xuống mâm qua hệ thủy lực
- Hộp giảm tốc: phối hợp tốc độ motor và mâm
- Phân ly: tách bột mịn ở phía trên
- Motor truyền động

Đặc điểm vận hành

- Tốc độ motor khoảng 1000 vòng/phút
- Tốc độ mâm nghiền 10 đến 30 vòng/phút
- Tải biến động theo lưu lượng than
- Môi trường bụi nóng, mài mòn cao

Nguyên lý: nghiền, sấy, phân ly cùng lúc

Ba chức năng được thực hiện trong cùng một thiết bị, dòng vật liệu đi theo chiều xác định.

- 1 Cấp than thô** Than vào từ trên đỉnh, rơi xuống mâm nghiền đang quay.
- 2 Nghiền dưới con lăn** Hệ thuỷ lực ép con lăn xuống lớp than. Mâm quay đưa than qua vùng nghiền liên tục.
- 3 Sấy bằng khí nóng** Khí nóng từ buồng đốt thổi vào, hong khô đồng thời với quá trình nghiền.
- 4 Phân ly bột mịn** Bột mịn được khí cuốn lên, đi qua bộ phân ly. Hạt lớn rơi về mâm nghiền lại.
- 5 Bột mịn ra ngoài** Bột đạt độ mịn yêu cầu được khí đưa sang lò đốt.

Bốn cụm chi tiết cần ưu tiên giám sát

Hệ con lăn , mâm nghiền

- Chịu tải lớn nhất
- Mòn bề mặt con lăn, mòn tấm lót mâm
- Va đập khi nghiền than cứng
- Tần số đặc trưng: tốc độ mâm, tốc độ con lăn

Hộp giảm tốc

- Có nhiều cấp bánh răng
- Mòn răng, lệch ăn khớp, vỡ răng
- Tần số đặc trưng: GMF mỗi cấp + sidebands
- Tải biến động khi than thay đổi

Ổ lăn các vị trí chính

- Có ở motor, hộp số, con lăn
- Bong tróc vòng trong, vòng ngoài, viên bi
- Lỗi sớm cần envelope mới phát hiện
- Tần số: BPFO, BPFI, BSF, FTF

Motor truyền động

- Mất cân bằng rotor, lệch tâm khớp nối
- 1× và 2× tốc độ quay rõ rệt
- Dòng điện tăng khi tải bất thường
- Tần số: 1×, 2× tốc độ motor

Thông số vận hành cần ghi song song với rung

Không có tải vận hành thì phổ rung rất dễ bị diễn giải sai.

Nhóm tốc độ

- RPM motor, RPM mâm
- Tốc độ bộ phân ly
- Trạng thái khởi động/dừng

Nhóm tải

- Lưu lượng than cấp
- Dòng điện motor
- Công suất tiêu thụ

Nhóm thuỷ lực

- Áp suất ép con lăn
- Dao động áp suất
- Vị trí xilanh

Nhóm công nghệ

- Nhiệt độ khí nóng
- Độ ẩm than
- Chênh áp máy nghiền

Cách dùng trong chẩn đoán

1. Gắn nhãn mỗi bản ghi rung theo chế độ vận hành: không tải, tăng tải, ổn định, giảm tải.
2. So sánh phổ chỉ trong cùng chế độ tải; tránh so phổ tải thấp với tải định mức.
3. Dùng biến tải và áp suất để tách lỗi cơ khí thật khỏi dao động do quá trình nghiền.
4. Lưu tối thiểu: thời gian đo, điểm đo, hướng đo, RPM, tải, nhiệt độ, áp suất, người đo.

Bản đồ hư hỏng máy nghiền kiểu đứng

Mỗi cụm chi tiết có cơ chế hỏng và dấu hiệu rung riêng. Khoanh vùng tần số giúp khoanh vùng cụm.

Bản đồ hư hỏng máy nghiền kiểu đứng

Con lăn

Mòn bề mặt
Gãy bạc đỡ

Mâm nghiền

Mòn tấm lót
Không đều

Ổ con lăn

Bong tróc vòng
BPFO / BPFI

Hộp giảm tốc

Mòn răng, lệch ăn khớp
GMF + sidebands

Khớp nối

Lệch tâm
1x và 2x shaft

Motor

Mất cân bằng
1x tốc độ quay

Hệ thủy lực

Áp lực không đều
Dao động lưu lượng

Bộ phân ly

Mòn cánh, kẹt
Tăng tải motor

Mỗi cụm chi tiết có dải tần đặc trưng riêng. Việc khoanh vùng tần số giúp khoanh vùng cụm hư hỏng.

FMEA nhanh cho máy nghiền đứng

Ưu tiên theo mức độ nghiêm trọng, khả năng phát hiện và tần suất xuất hiện.

Cụm	Mode hỏng	Dấu hiệu đo	Mức ưu tiên	Hành động
Con lăn - mâm	Mòn, nứt, lỏng bạc	RMS tăng, xung cao tần, 1× mâm	Rất cao	Dừng kiểm tra khi trend tăng nhanh
Hộp giảm tốc	Mòn/vỡ răng, lệch ăn khớp	GMF + sidebands, envelope xung	Rất cao	Kiểm tra dầu, nội soi, lập kế hoạch dừng
Ổ lăn	BPFO/BPFI/BSF/FTF	Envelope có đỉnh đặc trưng	Cao	Bôi trơn, theo dõi BCU, thay ổ
Motor/khớp nối	Mất cân bằng, lệch tâm	1×, 2×, rung dọc trục, pha	Cao	Cân bằng động/căn chỉnh laser
Thuỷ lực/quá trình	Dao động áp suất, nghẹt than	Rung đồng biến với áp suất/dòng	Trung bình	Kiểm tra van, lọc, cấp than

Ghi chú: FMEA cần được hiệu chỉnh bằng dữ liệu hỏng thực tế tại từng nhà máy và lịch sử sửa chữa của từng máy.

Hư hỏng con lăn và mâm nghiền

Cụm chịu tải trực tiếp nhất, hư hỏng thường gặp nhất trong thực tế.

Dạng hỏng	Cơ chế	Triệu chứng rung	Dải tần đặc trưng
Mòn bề mặt con lăn	Ma sát với than cứng, chu kỳ dài	Tăng RMS gia tốc, va đập tần số cao	> 1 kHz, envelope
Mòn tấm lót mâm không đều	Phân bố tải không đều quanh vòng quay	1× tốc độ mâm rõ, có điều chế	1× mâm + sidebands
Lỏng bạc đỡ con lăn	Khe hở tăng theo thời gian	Phổ có nhiều họa tần, dạng sóng méo	Nhiều bội tốc độ con lăn
Gãy bạc đỡ	Tải vượt giới hạn, mỏi	Xung va đập lớn, RMS tăng vọt	Broadband

Phân biệt mòn bề mặt, lệch tải và va đập

Cùng là RMS tăng nhưng cơ chế vật lý và hành động bảo trì khác nhau.

1. Mòn bề mặt đều

- RMS vận tốc tăng chậm
- Phổ không có đỉnh đơn trội
- Nhiệt độ và dòng motor tăng nhẹ
- Kiểm tra chiều dày lớp lót, lịch đảo/lắp tấm lót

2. Mòn không đều / lệch tải

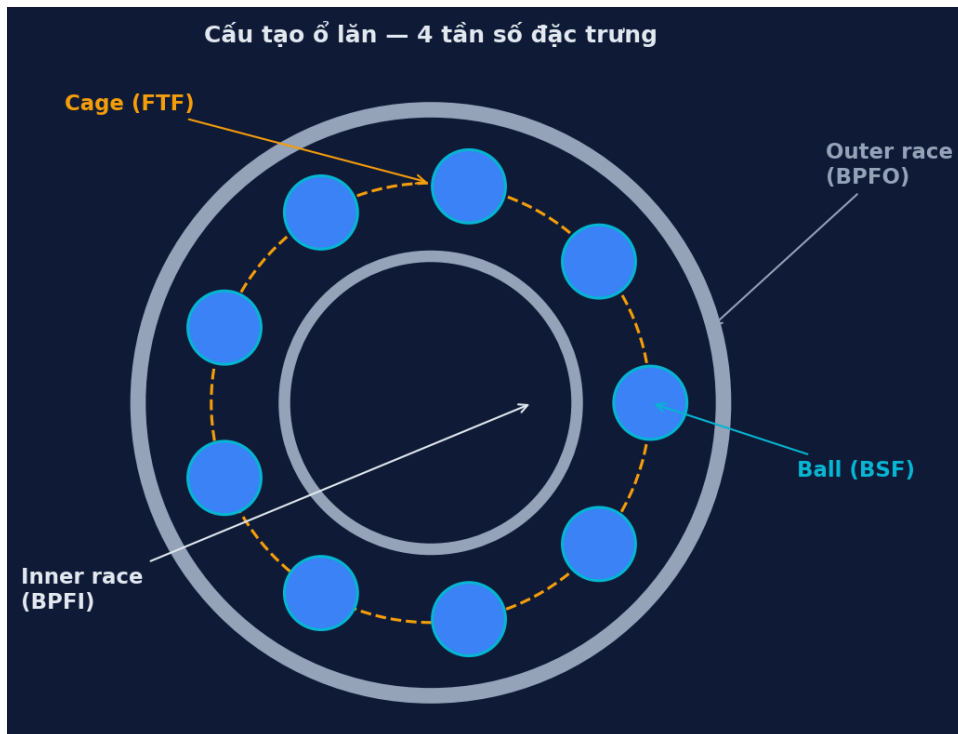
- $1\times$ tốc độ mâm và sidebands rõ
- Biên độ thay đổi theo lưu lượng than
- Có dao động áp suất ép
- Kiểm tra phân bố cấp than và hệ thủy lực

3. Nứt, gãy, va đập

- Xung cao tần trong TW
- Envelope tăng mạnh
- Broadband tại dải > 1 kHz
- Cần kiểm tra trực quan khi có trend tăng đột biến

Nguyên tắc: luôn ghép rung với tải, áp suất và âm thanh hiện trường; không kết luận chỉ từ một phổ đơn lẻ.

Hư hỏng ổ lăn: BPFO, BPFI, BSF, FTF



Bốn tần số đặc trưng

- BPFO: Ball Pass Frequency Outer race, hỏng vòng ngoài
- BPFI: Ball Pass Frequency Inner race, hỏng vòng trong
- BSF: Ball Spin Frequency, hỏng viên bi hoặc con lăn
- FTF: Fundamental Train Frequency, hỏng vòng cách

Tại sao cần envelope

- Va đập nhỏ tạo xung cao tần, gia tốc nhạy hơn vận tốc
- Envelope tách xung khỏi nhiễu nền
- Đỉnh tại BPFO, BPFI cùng với sidebands tốc độ trục
- Phát hiện lỗi sớm khi rung tổng thể chưa tăng

Công thức BPFO, BPFI, BSF, FTF

Dùng khi có thông số hình học ổ: số con lăn z , đường kính con lăn d , đường kính vòng chia D , góc tiếp xúc θ .

Công thức chuẩn theo tốc độ trục f_r

$$\text{BPFO} = z/2 \cdot f_r \cdot (1 - d/D \cdot \cos\theta)$$

$$\text{BPFI} = z/2 \cdot f_r \cdot (1 + d/D \cdot \cos\theta)$$

$$\text{BSF} = D/(2d) \cdot f_r \cdot [1 - (d/D \cdot \cos\theta)^2]$$

$$\text{FTF} = 1/2 \cdot f_r \cdot (1 - d/D \cdot \cos\theta)$$

Cách đọc envelope

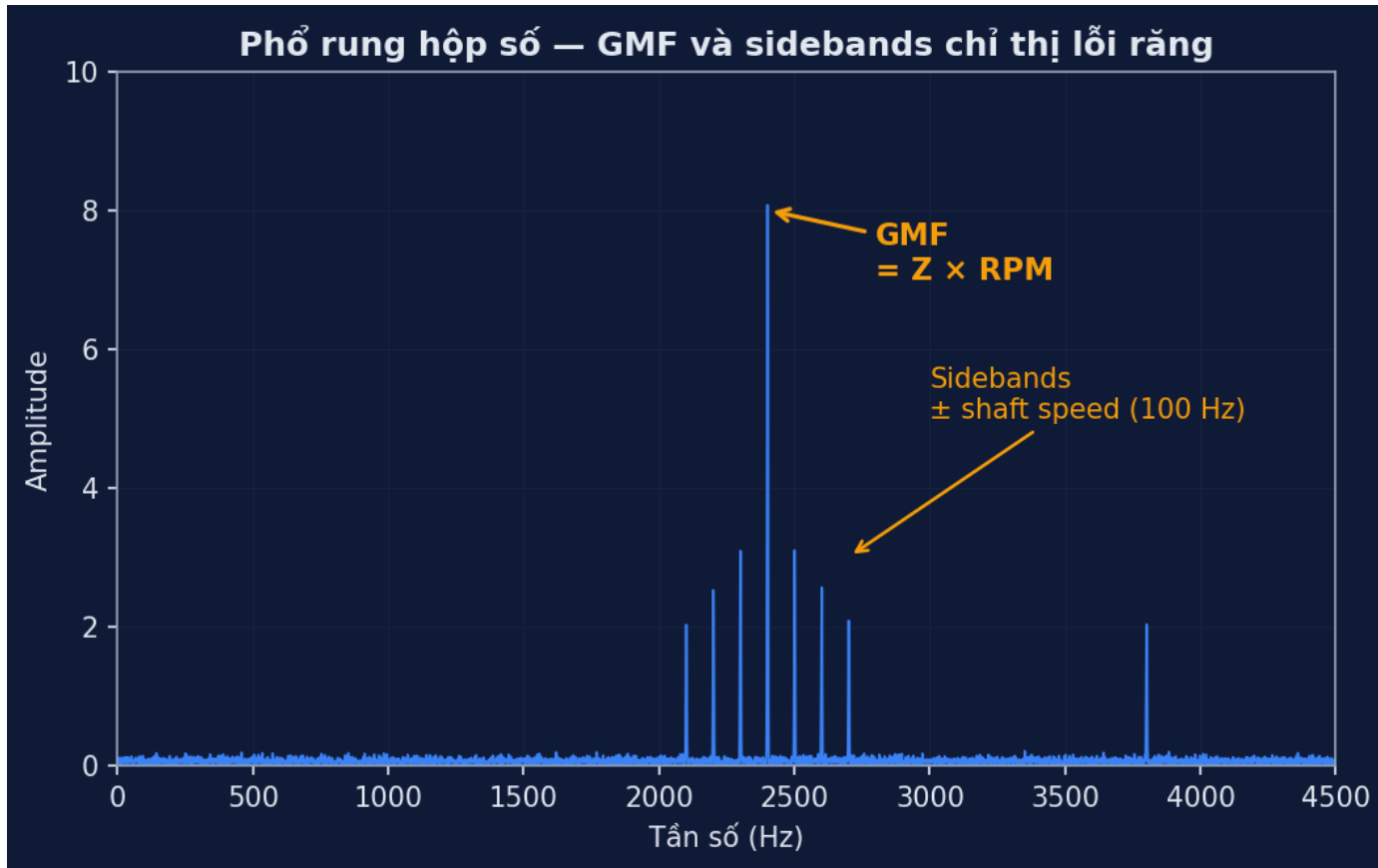
- Đỉnh chính tại BPFO/BPFI/BSF/FTF
- Sidebands cách nhau f_r khi lỗi quay theo trục
- So sánh với $1\times$ để tránh nhầm lẫn

Sai số thường gặp

- RPM đo không đúng thời điểm
- Ổ có trượt làm lệch tần số 1-3%
- Thông số ổ sai hoặc ổ đã thay đổi chủng loại

Khuyến nghị thực hành: dùng dải tìm kiếm $\pm 5\%$ quanh tần số lý thuyết, sau đó xác nhận bằng xu hướng tăng theo thời gian.

Hư hỏng hộp giảm tốc: GMF và sidebands



Đặc điểm phổ rung

- GMF = số răng $\times$ tốc độ trục
- Sidebands cách GMF một khoảng bằng tốc độ trục có lỗi
- Bội số $2 \times$ GMF, $3 \times$ GMF khi hư hỏng nặng

Cảnh báo từ thực tế

- GMF có thể chưa đổi nhiều nhưng sidebands tăng
- Phải đo ở tải làm việc thật, không phải tải thấp
- Cần kết hợp với envelope khi nghi vỡ răng

Quy trình đọc GMF và sidebands

Đi từ tần số cơ bản tới cơ chế hỏng, tránh nhầm GMF với cộng hưởng.

- 1 Xác định sơ đồ truyền**
Tốc độ từng trục, số răng từng cấp, tỉ số truyền thực tế.
- 2 Tính GMF từng cấp**
 $GMF = z \cdot fr$; lập bảng GMF, 2GMF, 3GMF và sidebands.
- 3 Đọc phổ theo cấp**
Đỉnh GMF cao chỉ báo ăn khớp; sidebands tăng chỉ báo lỗi cục bộ/modulation.
- 4 Xác nhận bằng TW/ES**
Vỡ răng cho xung lặp theo chu kỳ; envelope giúp tách va đập khỏi nền.

Cảnh báo: đo ở tải thấp có thể làm mất sidebands; nên đo khi máy ở chế độ ổn định gần tải vận hành thực.

Hư hỏng motor và khớp nối

Mất cân bằng rotor

- Trọng tâm rotor lệch tâm quay
- Lực ly tâm $F = m \cdot r \cdot \omega^2$ tăng theo bình phương tốc độ
- 1× tốc độ rotor trội rõ
- Phổ "sạch", waveform gần hình sin

Lỏng cơ khí

- Lỏng bulông chân đế, lỏng gối đỡ, móng yếu
- Phổ "bẩn", nhiều họa tần 2×, 3×, 4×, 5×
- Biên độ H/V chênh lệch rõ
- Có sub-harmonic 0.5× khi nặng

Lệch tâm khớp nối

- Hai trục nối không đồng tâm hoặc không song song
- Tỷ số 2× / 1× lớn hơn 1.5
- Có rung dọc trục đáng kể
- Lệch pha 180 độ giữa hai gối qua coupling

Lỗi điện trong motor

- Lệch khe hở stator-rotor
- Mất pha, ngắn mạch cuộn dây
- Tăng dòng điện kèm rung
- Cần kết hợp đo dòng điện

Tổng hợp: nhìn vào đâu để chẩn đoán gì

Đặc điểm	Khả năng cao là:
1× tốc độ rotor trội, phổ sạch	Mất cân bằng rotor
1× và 2× cùng cao, $2\times > 1.5$ lần $1\times$	Lệch tâm khớp nối
Nhiều họa tần 2×, 3×, 4×	Lỏng cơ khí
Xung va đập định kỳ, envelope có BPFO/BPFI	Hư ổ lăn
GMF cao + sidebands $\pm$ tốc độ trục	Mòn răng bánh răng
Rung tăng khi quay qua dải tốc độ nhất định	Cộng hưởng kết cấu
Tăng dòng điện kèm tăng rung	Lỗi điện trong motor

Dùng tiêu chuẩn rung đúng vai trò

ISO giúp đánh giá mức rung tổng thể, còn chẩn đoán lỗi cần phổ tần, envelope và xu hướng.

ISO 10816 / ISO 20816

- Đánh giá mức rung tổng thể của máy quay
- Thường dùng vận tốc RMS vùng 10-1000 Hz
- Phân vùng A/B/C/D: tốt - chấp nhận - cảnh báo - nguy hiểm

ISO 17359

- Khung chung cho condition monitoring
- Xác định đối tượng, chế độ hỏng, điểm đo, ngưỡng và quy trình phản ứng
- Phù hợp để xây quy trình PdM

ISO 13373

- Hướng dẫn đo và phân tích rung
- Bao gồm xử lý tín hiệu, trend, chẩn đoán máy quay
- Cơ sở cho đào tạo kỹ thuật viên rung

Nguyên tắc đặt ngưỡng tại nhà máy

Baseline riêng cho từng máy + cảnh báo theo trend + xác nhận bằng tần số đặc trưng. Không dùng một ngưỡng tuyệt đối cho mọi chế độ tải.

Thiết bị đo rung dùng cho VRM

Máy chính: Vibrotest 80

- Hãng: Brüel & Kjær Vibro (Đức)
- Thiết bị đo cầm tay, tách rời cảm biến
- Phân tích đa kênh: rung, tốc độ, nhiệt
- Hỗ trợ AS, ES, time waveform cùng lúc

Cảm biến gia tốc AS-063

- Hãng: Brüel & Kjær Vibro
- Độ nhạy: 100 mV/g
- Dải tần làm việc: 1 đến 10 000 Hz
- Gắn bằng nam châm hoặc keo dán

Cảm biến pha khoá PA-98

- Hãng: CompactInstrument (MiniVLS, 5V)
- Đồng bộ pha rung với vòng quay trục
- Cần thiết khi đo order tracking

Phần mềm phân tích

- OMNITREND cho lưu trữ và xu hướng
- Xuất phổ AS, ES, time waveform
- So sánh với baseline đã thiết lập

Sơ đồ điểm đo rung cho VRM

Bổ sung mục B.8 để khớp mạch nội dung trước AS, ES, TW.

M1

Motor DE/NDE

H, V, A - phát hiện 1×, 2×, lỗi điện, lệch tâm

G1

Hộp giảm tốc vào

H, V, A - GMF cấp nhanh, ổ trục đầu vào

G2

Hộp giảm tốc ra

H, V - GMF cấp chậm, tải mâm nghiền

R1-R4

Gối con lăn

V, radial - va đập, mòn bạc, envelope

S1

Bộ phân ly

H, V - mất cân bằng, lỏng cơ khí

H1

Cụm thủy lực

Áp suất - dao động ép con lăn, van, lọc

Ký hiệu hướng đo: H - horizontal, V - vertical, A - axial. Luôn ghi rõ hướng để so sánh trend đúng.

Phép đo Autospectrum: phổ tần số rung động

Đo trung bình theo tần số. Đại lượng cơ bản nhất để xác định thành phần rung.

Phổ vận tốc 5-1000 Hz

- Đơn vị: mm/s RMS
- Trung bình kiểu RMS
- Hàm cửa sổ Hanning
- Dùng để đối chiếu chuẩn ISO 10816

Phổ gia tốc 10-5000 Hz

- Đơn vị: g, peak
- Phát hiện lỗi tần số cao
- Nhạy với va đập, mòn ổ
- Là đầu vào để tính envelope

Cách đọc phổ AS

- Đỉnh 1× tốc độ rotor: mất cân bằng
- Đỉnh 2× cao, có rung dọc trục: lệch khớp nối
- Nhiều họa tần 2×, 3×, 4×, 5×: lỏng cơ khí
- GMF + sidebands cách đều $\pm$ tốc độ trục: mòn bánh răng

Phép đo Envelope: phổ đường bao

Tách xung và đập khỏi nhiễu nền. Là công cụ chủ lực để phát hiện sớm hư hỏng ổ lăn.

Thông số đo

- Đơn vị: BCU (Bearing Condition Unit)
- Trung bình kiểu peak
- Dải lọc 0-1000 Hz
- Bandpass cộng hưởng vỏ ổ trước khi demodulate

Vai trò trong chẩn đoán

- Phát hiện ổ lăn từ giai đoạn rất sớm
- Đỉnh BPFO, BPFI, BSF, FTF
- Có sidebands $\pm$ tốc độ trục
- Còn được gọi là PeakVue (Emerson), SEE (SKF)

Quy trình ba bước

- Bước 1: lọc băng quanh dải cộng hưởng tự nhiên của vỏ ổ
- Bước 2: lấy đường bao (envelope) của tín hiệu đã lọc
- Bước 3: FFT trên đường bao, đọc đỉnh ở các tần số đặc trưng của ổ

Phép đo Time waveform: tín hiệu gia tốc theo thời gian

Quan sát trực tiếp dạng sóng. Phát hiện hiện tượng tuần hoàn và xung bất thường.

Thông số đo

- Đơn vị: g (gia tốc trọng trường)
- Tần số lấy mẫu 25600 Hz
- Thời gian lấy mẫu 50 giây
- Đủ để bao quát nhiều vòng quay đầy đủ

Lợi ích

- Đo trực tiếp xung và đập, không gián tiếp qua phổ
- Đếm được số xung trong một vòng quay
- Phát hiện ăn khớp bánh răng không đều
- Phục vụ event capture khi có cảnh báo

Khi nào dùng TW

- Khi nghe có tiếng gằn theo nhịp đều đặn
- Khi nghi vỡ răng, va đập của bánh răng chủ với vành răng thùng nghiền
- Khi cần đo order tracking với cảm biến pha khoá
- Khi cần kiểm chứng phổ AS / ES bằng quan sát trực tiếp

Từ tín hiệu thô đến quyết định bảo trì

Quy trình cần thống nhất để kết quả giữa các lần đo và giữa các nhà máy so sánh được.



Quy tắc chất lượng dữ liệu

- Không dùng bản ghi thiếu RPM hoặc sai điểm đo
- Loại đoạn khởi động/dừng khi phân tích tải ổn định
- Lưu dạng sóng thô cho kiểm chứng sau này

Đầu ra nên có

- Loại lỗi + xác suất + mức khẩn cấp
- Tần số chứng cứ chính
- Hành động khuyến nghị và thời hạn kiểm tra

Tại sao chỉ đo rung là chưa đủ

Chẩn đoán dựa trên một loại tín hiệu thường bỏ sót các vấn đề liên quan đến quá trình công nghệ.

Hạn chế khi chỉ dùng tín hiệu rung

- Có dạng hổng không lộ rõ trên phổ rung, như nhiệt độ ổ bi tăng do thiếu dầu
- Nhiều bất thường chỉ xuất hiện khi tải vào tải ra biến động lớn
- Không phân biệt được nguyên nhân cơ khí và nguyên nhân quá trình
- Khó dự báo RUL nếu chỉ có một loại tín hiệu
- Ngưỡng cố định trên phổ rung dễ báo sai khi vận hành chuyển chế độ
- Một tín hiệu duy nhất dễ nhiễu, độ tin cậy thấp khi cảm biến lỗi

Tại sao cần đa nguồn

- Mỗi loại tín hiệu cung cấp một góc nhìn riêng
- Kết hợp giúp xác nhận chéo, giảm cảnh báo giả
- Có thể tách biệt nguyên nhân cơ khí và quá trình
- Tận dụng được dữ liệu SCADA sẵn có
- Mô hình AI làm việc tốt hơn với nhiều đầu vào
- Là cơ sở cho dự báo RUL chính xác hơn

Chuẩn hoá dữ liệu đầu vào cho AI đa nguồn

Mô hình AI chỉ tốt khi dữ liệu có định nghĩa, tần suất và chất lượng ổn định.

Rung

AS vận tốc, AS gia tốc, ES/BCU, TW gia tốc, RPM, điểm đo, hướng đo, ngày giờ, người đo.

SCADA

Dòng motor, công suất, nhiệt độ ổ, nhiệt độ khí, lưu lượng than, chênh áp, trạng thái van.

Bảo trì

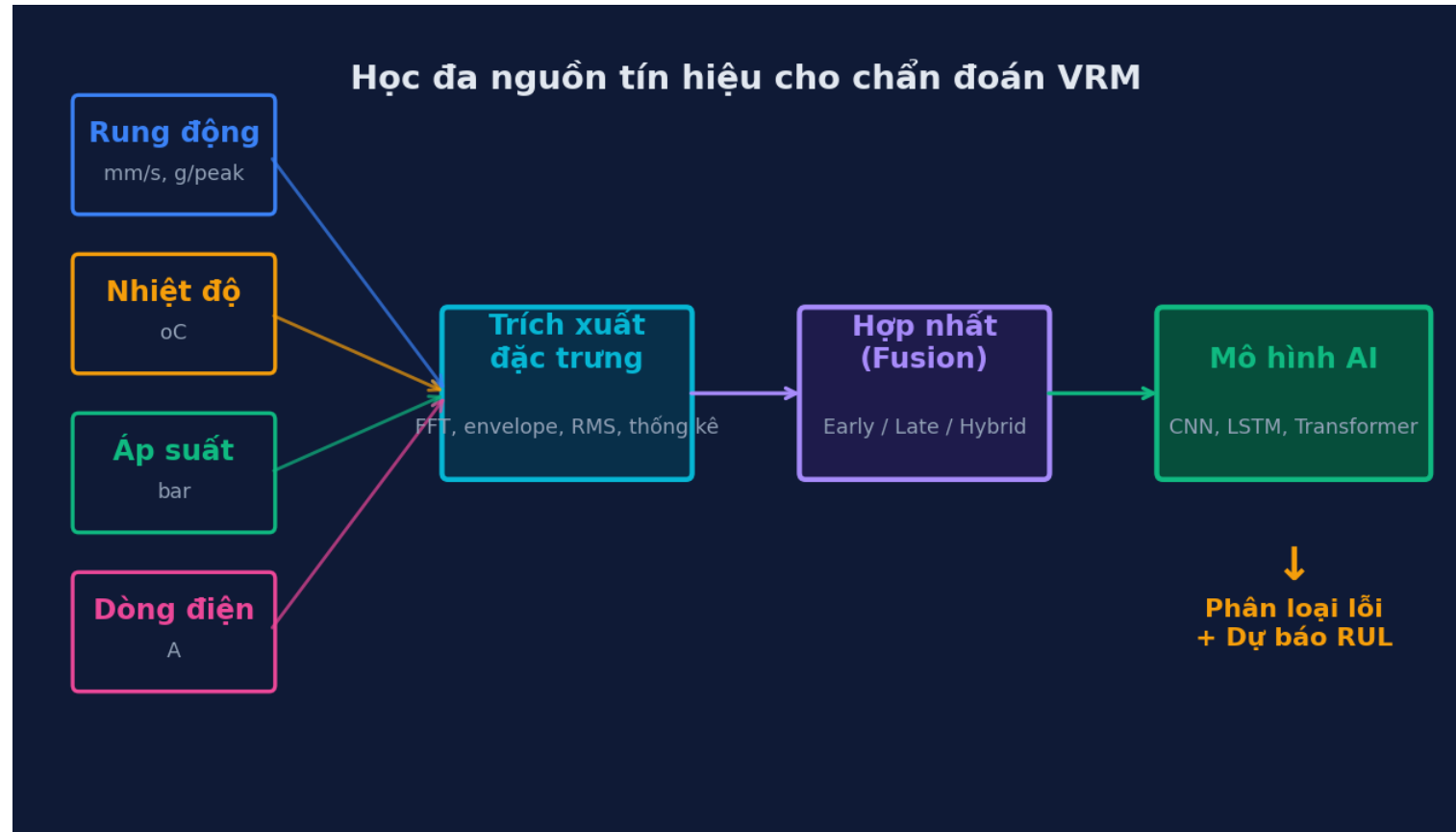
Lịch thay ổ, căn chỉnh, bôi trơn, thay tấm lót, kiểm tra dầu, biên bản dừng máy.

Nhãn lỗi

Ngày phát hiện, loại lỗi, mức độ, cụm lỗi, ảnh hiện trường, nguyên nhân gốc.

Khóa liên kết dữ liệu: MachineID + PointID + Direction + Timestamp + OperatingMode

Kiến trúc học đa nguồn tín hiệu



Bốn nguồn tín hiệu thường gặp

Rung động (mm/s, g) · Nhiệt độ ổ (°C) · Áp suất thuỷ lực (bar) · Dòng điện motor (A) , đều dễ thu thập từ SCADA hiện có.

Ba kiểu hợp nhất: Early, Late, Hybrid

Early Fusion

Gộp tín hiệu thô trước khi đưa vào mô hình.

- Đầu vào: vectors ghép từ nhiều cảm biến
- Ưu: học được tương quan giữa các tín hiệu
- Nhược: cần đồng bộ thời gian chặt
- Phù hợp khi tín hiệu cùng tần số lấy mẫu

Late Fusion

Mỗi tín hiệu có mô hình riêng, kết hợp kết quả ở đầu ra.

- Mỗi nhánh học đặc trưng riêng
- Ưu: linh hoạt, dễ cập nhật từng nhánh
- Nhược: không khai thác tương quan thô
- Phù hợp khi các tín hiệu khác nhau về tần số

Hybrid Fusion

Trộn cả hai kiểu trên trong cùng một kiến trúc.

- Một số tầng trộn sớm, một số trộn muộn
- Ưu: cân bằng giữa tính giải thích và độ chính xác
- Nhược: thiết kế phức tạp hơn
- Là hướng nghiên cứu thực tiễn hiện nay

Xử lý khác biệt tần số lấy mẫu giữa các nguồn

Rung có thể 5-50 kHz, trong khi SCADA thường 1-10 s/mẫu; phải đồng bộ theo cửa sổ.

1. Căn thời gian

- Đồng bộ đồng hồ thiết bị đo
- Gắn timestamp bắt đầu/kết thúc
- Cửa sổ đặc trưng: 10-60 s

2. Chuẩn hoá chế độ

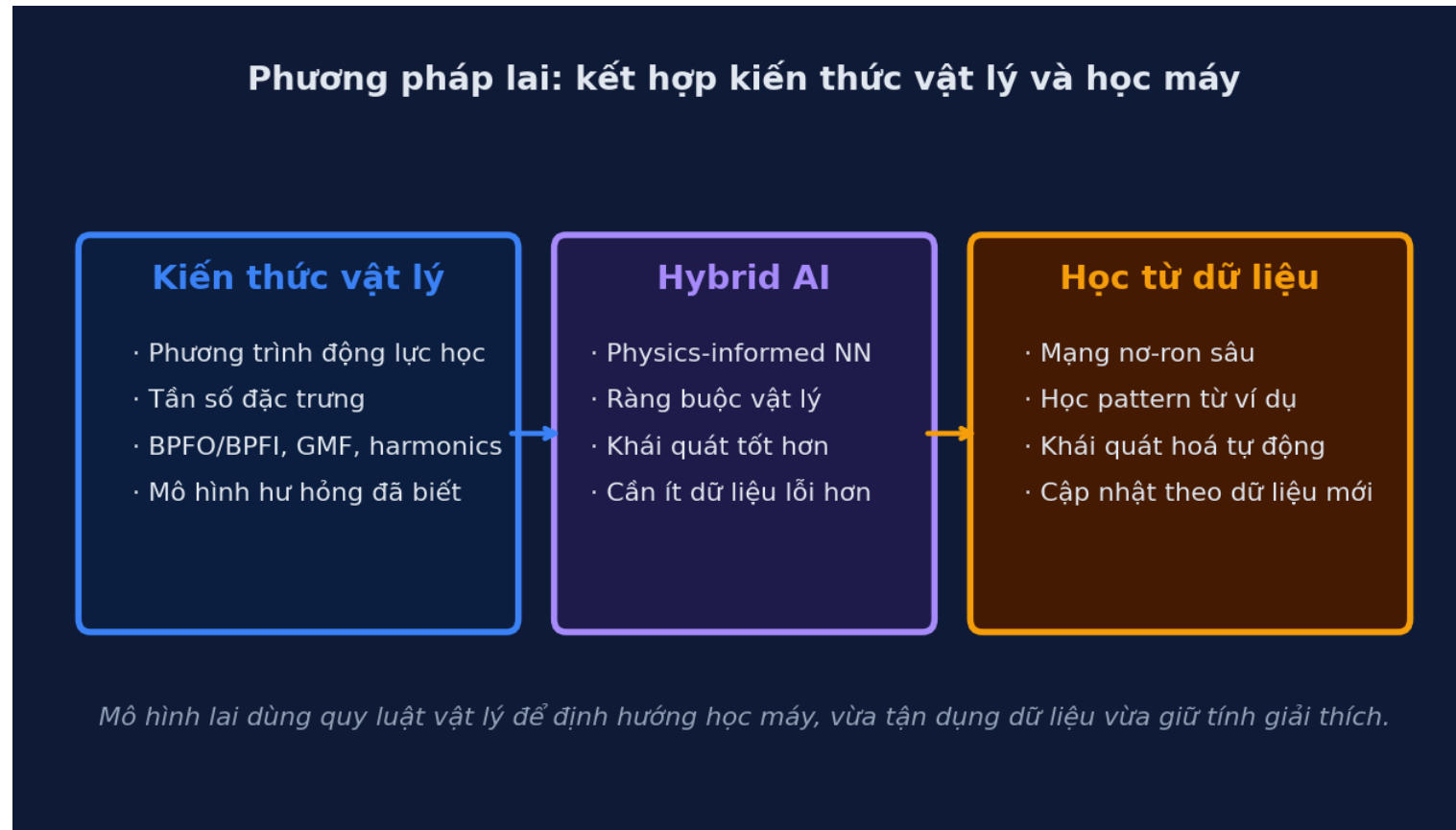
- Tách steady-state và transient
- Gắn nhãn tải: thấp/vừa/cao
- Chuẩn hoá theo RPM hoặc order

3. Làm sạch

- Loại sensor dropout
- Kiểm tra outlier vật lý
- Nội suy SCADA có kiểm soát

Đầu vào AI nên là “cửa sổ dữ liệu” gồm đặc trưng rung + thống kê SCADA trong cùng khoảng thời gian.

Phương pháp lai: kết hợp kiến thức vật lý và học máy



Vì sao Hybrid là hướng tiếp cận thực tiễn

Khái quát tốt hơn khi dữ liệu lỗi thực tế ít, đồng thời giữ được tính giải thích cho kỹ sư hiện trường.

AI phải giải thích được cho kỹ sư hiện trường

Không chỉ trả về nhãn lỗi; cần chỉ ra chứng cứ rung và biến vận hành liên quan.

Rule vật lý

- 1× cao → mất cân bằng
- 2× + axial → lệch tâm
- GMF sidebands → bánh răng
- BPFO/BPFI → ổ lăn

Mô hình học máy

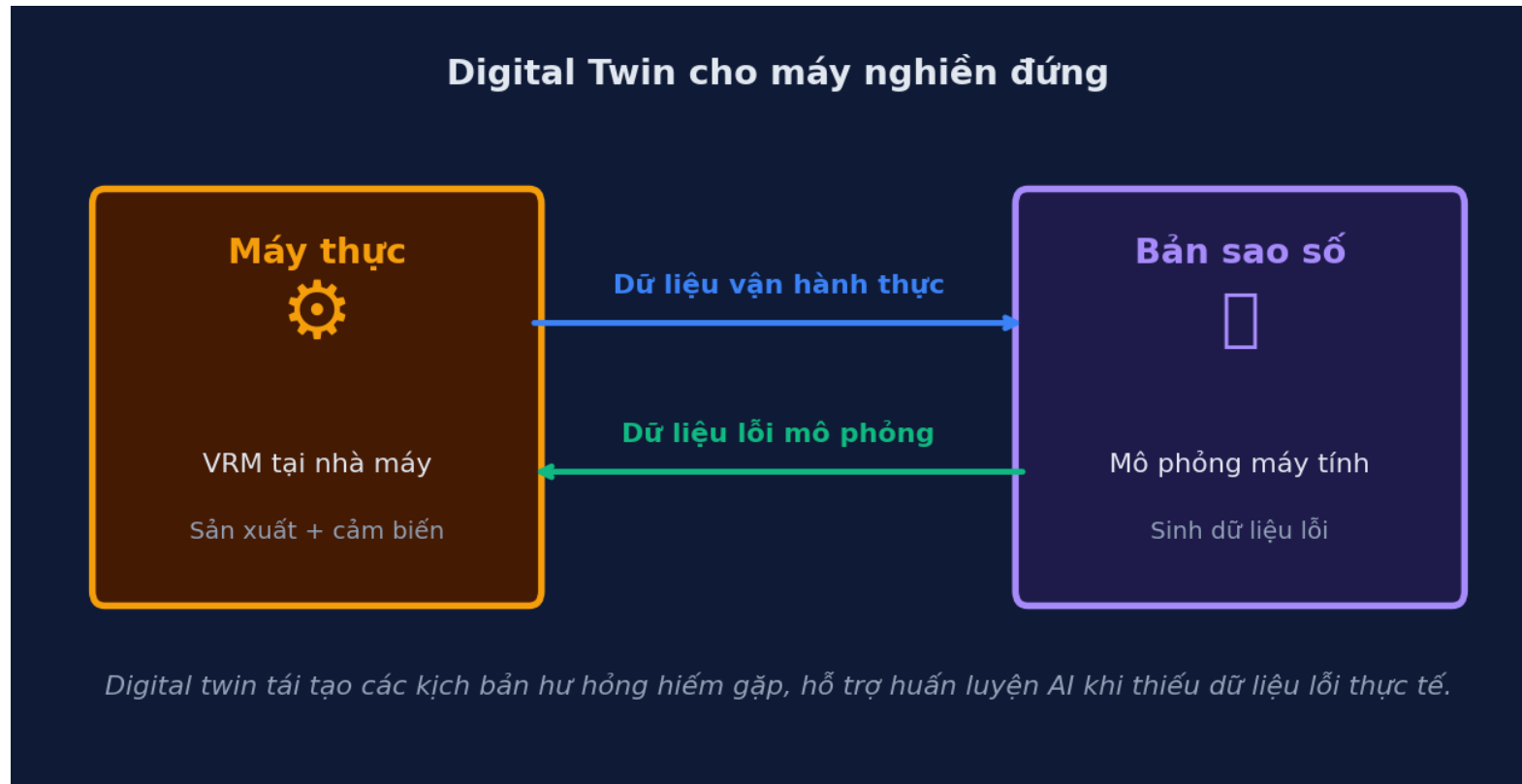
- Random Forest / XGBoost cho đặc trưng
- CNN/Transformer cho phổ hoặc waveform
- Autoencoder cho bất thường không nhãn

XAI / bằng chứng

- SHAP: biến nào đóng góp chính
- Saliency: vùng phổ nào quan trọng
- Báo cáo: tần số, trend, mức tin cậy

Cấu trúc kết luận tốt: “Khả năng cao lỗi ổ vòng ngoài, chứng cứ BPFO $\pm 3\%$, BCU tăng 45% trong 2 tuần, tải vận hành không đổi”.

Digital twin: bản sao số của máy nghiền đứng



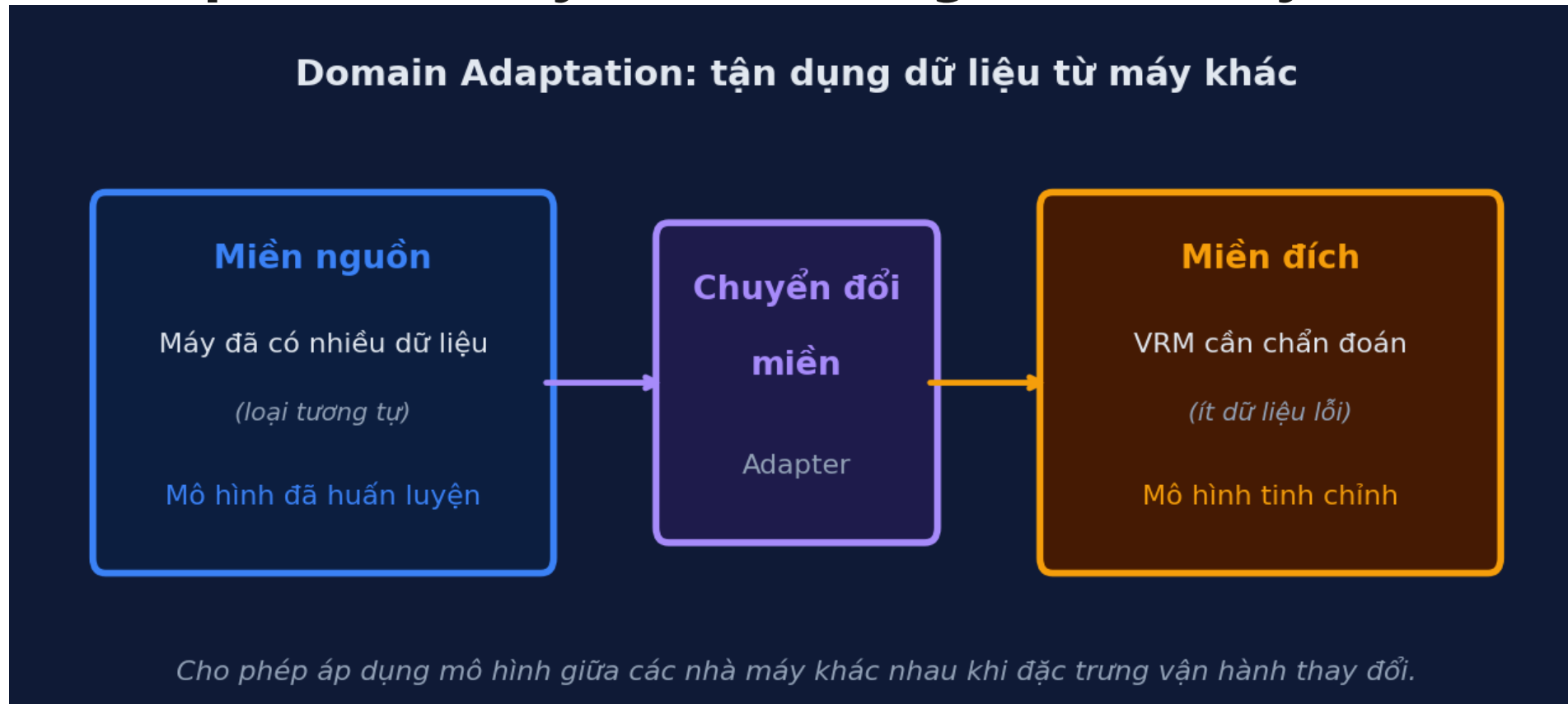
Vai trò chính

- Tái tạo các kịch bản hư hỏng hiếm gặp trên máy tính
- Bổ sung dữ liệu lỗi cho huấn luyện AI

Đóng góp cho đề tài

- Một trong các sản phẩm chính của đề tài cấp Bộ 2026
- Phối hợp thử nghiệm tại nhà máy nhiệt điện Vĩnh Tân 4

Domain adaptation: chuyển mô hình giữa các máy



Khi nào dùng

- Khi máy đích thiếu dữ liệu lỗi
- Khi triển khai cho nhà máy mới chưa có baseline

Kỹ thuật chính

- Transfer learning từ máy đã giám sát
- Adversarial alignment giữa hai miền dữ liệu

Tiêu chí đánh giá mô hình chẩn đoán và dự báo

Tách rõ bài toán phân loại lỗi, phát hiện bất thường và dự báo RUL.

Phân loại lỗi

- Accuracy chỉ dùng tham khảo
- Precision/Recall/F1 theo từng lớp lỗi
- Confusion matrix để xem lỗi nhầm nguy hiểm

Phát hiện bất thường

- False alarm rate
- Missed alarm rate
- Detection delay: cảnh báo trước hỏng bao lâu
- AUC/PR-AUC khi mất cân bằng dữ liệu

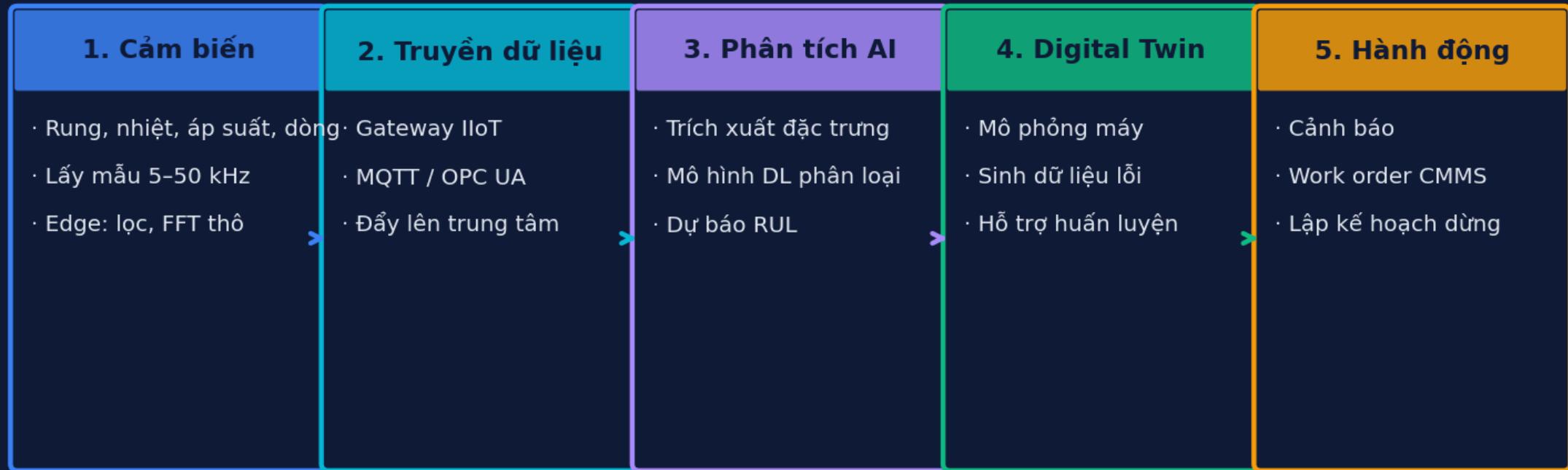
Dự báo RUL

- MAE/RMSE của RUL
- Prognostic horizon
- Độ ổn định của trend
- Cập nhật khi có dữ liệu bảo trì mới

Nghiệm thu thực tế nên ưu tiên: giảm cảnh báo giả, phát hiện sớm lỗi nghiêm trọng, và khuyến nghị hành động rõ ràng.

Kiến trúc hệ thống giám sát thông minh năm lớp

Kiến trúc hệ thống giám sát thông minh cho VRM



Năm lớp phối hợp: thu thập, truyền, phân tích, mô phỏng và ra hành động.

Năm lớp phối hợp: cảm biến tại máy, truyền dữ liệu lên trung tâm, phân tích AI, bản sao số hỗ trợ huấn luyện, và lớp hành động ra cảnh báo / work order.

Kiến trúc dữ liệu triển khai thực tế

Từ đo định kỳ có thể nâng cấp dần sang giám sát online, không cần thay toàn bộ hệ thống cùng lúc.

- | | | |
|--------------|--------------------------|--|
| Mức 1 | Đo định kỳ | Vibrotest, báo cáo thủ công, baseline từng máy |
| Mức 2 | Dữ liệu tập trung | Chuẩn hoá file rung + SCADA + lịch bảo trì |
| Mức 3 | AI offline | Huấn luyện, kiểm chứng, báo cáo tuần/tháng |
| Mức 4 | Giám sát online | Cảm biến online, cảnh báo real-time, CMMS |

Chiến lược đề xuất: bắt đầu bằng chuẩn hoá dữ liệu đo định kỳ và lịch sử bảo trì; sau đó chọn 1-2 máy trọng yếu để lắp cảm biến online thí điểm.

Bài học và định hướng đề tài

Bài học chung về chẩn đoán rung

- Đo rung động đúng quy trình là nền tảng
- Cần kết hợp ba phép đo AS, ES, TW để chẩn đoán đa diện
- Một dấu hiệu rung có thể đến từ nhiều nguyên nhân, phải xem ngữ cảnh
- Hư hỏng thường liên kết: ổ lăn mòn dẫn đến lệch khớp nối, lệch khớp gây va đập ăn khớp bánh răng
- Đo định kỳ giúp phát hiện sớm, nhưng giám sát liên tục mới đạt tối ưu
- Cần baseline để so sánh xu hướng theo thời gian

Hướng tiếp theo cho VRM

- Lắp đặt cảm biến online tại các điểm trọng yếu
- Kết nối SCADA + cảm biến rung vào nền tảng dữ liệu chung
- Triển khai mô hình học đa nguồn cho VRM
- Xây dựng digital twin cho từng loại máy nghiền
- Áp dụng phương pháp lai vật lý cho khái quát hoá tốt hơn
- Đào tạo đội bảo trì đọc kết quả AI và phản hồi cải tiến

Đề tài cấp Bộ: AI chẩn đoán và dự báo hư hỏng VRM

PGS.TS. Nguyễn Trọng Du, ĐHBK Hà Nội, 2026-2027. Phối hợp với nhà máy nhiệt điện Vĩnh Tân 4.

24 tháng

Thời gian

1650 tr.đ

Kinh phí

7 nội dung

Phạm vi nghiên cứu

NĐ Vĩnh Tân 4

Đơn vị thử nghiệm

Nội dung	Mô tả
Nội dung 1	Tổng quan VRM, khảo sát hiện trường, phân tích đối tượng
Nội dung 2	Phương pháp AI cho dữ liệu thời gian, đa nguồn, lai vật lý
Nội dung 3	Mô hình mô phỏng và digital twin cho VRM
Nội dung 4	Thu thập, xử lý, trích xuất đặc trưng từ dữ liệu thực tế và mô phỏng
Nội dung 5	Thiết kế và kiểm chứng mô hình AI cho chẩn đoán và dự báo
Nội dung 6	Tích hợp, thử nghiệm tại nhà máy, hoàn thiện hệ thống tổng thể
Nội dung 7	Bộ tài liệu kỹ thuật, hướng dẫn, đăng ký sở hữu trí tuệ

Lộ trình 24 tháng từ khảo sát đến thử nghiệm

Gắn từng giai đoạn với sản phẩm bàn giao cụ thể để dễ quản lý tiến độ.

0-3 tháng

Khảo sát
VRM,
FMEA,
danh mục
cảm biến,
chuẩn dữ
liệu

4-8 tháng

Thu thập
dữ liệu
rung/SCAD
A, xây
baseline,
quy trình đo

9-14 tháng

Digital twin,
mô phỏng
lỗi, trích
xuất đặc
trưng, kho
dữ liệu

15-20 tháng

Huấn luyện
AI đa
nguồn, XAI,
đánh giá
offline

21-24 tháng

Tích hợp
thử nghiệm,
hướng dẫn
vận hành,
thử nghiệm thu

Sản phẩm cuối: bộ dữ liệu chuẩn, mô hình AI, digital twin, quy trình đo, tài liệu hướng dẫn, và báo cáo thử nghiệm tại nhà máy.

Tài liệu tham khảo và nguồn dẫn

Tiêu chuẩn quốc tế

- ISO 10816-3, đánh giá mức rung
- ISO 20816-1, 20816-3, phiên bản mới
- ISO 17359, hướng dẫn condition monitoring
- ISO 13373, vibration condition monitoring

Tài liệu nội bộ và đề tài

- Quy trình Công tác thực hiện đo, NILP, ĐHBK
- Đề cương đề tài AI VRM cấp Bộ 2026-2027
- Đề cương giảng dạy Vicem V2, 2026

Bài báo và sách kỹ thuật

- Agrawal et al. 2015, Review of coal mill fault diagnosis
- Hu et al. 2020, Modeling of coal mill system
- Zeng et al., Dual-attention LSTM autoencoder
- Brüel & Kjær BO-0501, Envelope Analysis
- Power-MI, ACOEM bearing fault frequencies

Nguồn bổ sung

Bổ sung nhóm tiêu chuẩn, sách chẩn đoán rung, AI/PdM và digital twin.

Tiêu chuẩn & hướng dẫn

- ISO 20816-1/3: Mechanical vibration - Evaluation of machine vibration
- ISO 17359: Condition monitoring and diagnostics of machines
- ISO 13373 series: Vibration condition monitoring

Chẩn đoán rung

- Randall, Vibration-based Condition Monitoring
- Mobley, An Introduction to Predictive Maintenance
- Brüel & Kjær Vibro, Envelope Analysis application notes

AI/PdM

- Jardine et al., A review on machinery diagnostics and prognostics
- Lei et al., Machinery health prognostics: a systematic review
- Zhang et al., Deep learning for intelligent fault diagnosis

Digital twin / domain adaptation

- Tao et al., Digital twin-driven product design/manufacturing/service
- Ben-David et al., Domain adaptation theory
- Wang & Deng, Deep visual domain adaptation survey

Cảm ơn đã theo dõi

Buổi sáng 11/6: AI cho giám sát thông minh (PdM, RAG, XAI)

Điểm cần nhớ

- Đo rung theo quy trình chuẩn là nền tảng
- Kết hợp ba phép đo AS, ES, time waveform
- Một bất thường thường có nhiều nguyên nhân liên kết
- Học đa nguồn tín hiệu cho chẩn đoán toàn diện
- Phương pháp lai vật lý + dữ liệu khái quát tốt hơn
- Digital twin bù đắp khi thiếu dữ liệu lỗi thực

Câu hỏi và thảo luận

- Máy nghiền của nhà máy bạn đang giám sát thế nào?
- Có dữ liệu SCADA chưa? Đã kết nối với hệ rung chưa?
- Tần suất bảo trì hiện tại có hợp lý không?
- Vị trí cảm biến hiện tại đã đủ chưa?
- Có thể chia sẻ dữ liệu để xây mô hình AI chung?

Liên hệ: PGS.TS. Nguyễn Trọng Du, du.nguyentrong@hust.edu.vn, ĐHBK Hà Nội.