

การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลสำหรับการศึกษาผลกระทบ
ของแขนจับหัวอ่าน/เขียนในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์



นาย เดโช บุญครอง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2546

ISBN 974-17-3843-9

ลิขสิทธิ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

FACTORIAL EXPERIMENTAL DESIGN FOR STUDYING
THE EFFECTS OF SUSPENSION IN HARD DISK DRIVE

Mr. Decho Boonkrong



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Industrial Engineering

Department of Industrial Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2003

ISBN 974-17-3843-9

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลสำหรับการศึกษผลกระทบบ
ของแขนจับหัวอ่าน/เขียนในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

โดย

นาย เตโช บุญครอง

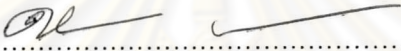
สาขาวิชา

วิศวกรรมอุตสาหการ

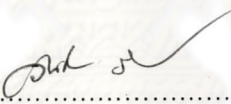
อาจารย์ที่ปรึกษา

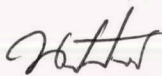
อาจารย์ ดร.นภัตตวงศ์ ไอสถศิลป์

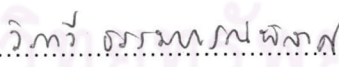
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

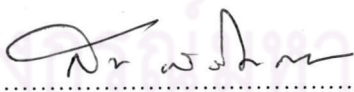

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.ดิเรก ลาวัญย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.วันชัย ธิวัชรนิช)


.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ ดร. นภัตตวงศ์ ไอสถศิลป์)


.....กรรมการ
(อาจารย์ ดร.วิภาวี ธรรมภรณ์พิลาศ)


.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมชาย พัวจินดาเนตร)

เดโช บุญครอง : การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลสำหรับการศึกษาผลกระทบของ
แขนจับหัวอ่าน/เขียนในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (FACTORIAL EXPERIMENTAL DESIGN
FOR STUDYING THE EFFECTS OF SUSPENSION IN HARD DISK DRIVE)

อ.ที่ปรึกษา : ดร.นภัสวงค์ โอสถศิลป์ ,185 หน้า, ISBN 974-17-3843-9

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลหลัก (Main effect) และอันตรกิริยา (Interaction) ของ
4 ปัจจัยหลักของแขนจับหัวอ่าน/เขียนประเภทเบสเพลตในรุ่นความยาว 14.5 ม.ม.ที่มีผลต่อค่า G-to-
Lift off ที่สภาวะ Shock Pulse Duration 0.1 และ 0.35 ms และต่อความถี่ธรรมชาติที่จะเกิดกำทอน
ในโหมดสเวย์ (Sway Frequency) ปัจจัยที่ทำการศึกษาประกอบด้วยอัตราส่วนของความยาว Hinge
บริเวณที่มีคุณสมบัติคล้ายสปริงต่อความยาวทั้งตัว (L_1/L_{total}) ความหนาของ Hinge (t_1) ความกว้าง
ของ Hinge บริเวณที่มีคุณสมบัติคล้ายสปริง (W) และความหนาของ Load beam (t_2) งานวิจัยนี้ยัง
ศึกษาแนวโน้มการออกแบบของแต่ละปัจจัยเมื่อต้องการให้ทุกผลตอบมีค่ามากที่สุดและศึกษา
ความสัมพันธ์เชิงสถิติระหว่างความเร็วของหัวอ่าน/เขียนขณะตกกระทบบนแผ่นดิสก์กับค่า G-to-Lift
off เมื่อแขนจับหัวอ่าน/เขียนอยู่ในสภาวะชอร์กระดับเกินค่า G-to-Lift off เพื่อให้พิจารณาเลือก
แนวทางการออกแบบและเสนอแนวทางการออกแบบนั้นเพื่อให้แขนจับหัวอ่าน/เขียนสามารถอยู่ใน
สภาวะชอร์ที่สูงๆได้อย่างปลอดภัย สุดท้ายศึกษาความน่าเชื่อถือของข้อมูลที่ได้จากการคำนวณโดยไฟ
ไนอีลีเมนต์ (Finite Element) โดยการเปรียบเทียบผลกับการทดสอบผลิตภัณฑ์จริง ซึ่งทั้งหมดจะ
ประยุกต์ใช้หลักการการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k และการวิเคราะห์แบบถดถอย

ผลการวิจัยสามารถสรุปแนวโน้มการออกแบบปัจจัยของแขนจับหัวอ่าน/เขียนเพื่อเพิ่ม
คุณสมบัติการต้านทานชอร์ทั้งในสภาวะชอร์ที่ต่ำกว่าระดับค่า G-to-Lift off และเกินระดับค่า G-to-
Lift off และความถี่ธรรมชาติที่เกิดกำทอนในโหมดสเวย์ให้มีค่าสูงขึ้น คือ อัตราส่วนของ L_1/L_{total} ยาว
ขึ้น ความหนาของ Hinge หนาขึ้น ความกว้างของ Hinge บริเวณที่มีคุณสมบัติคล้ายสปริง (W) กว้าง
ขึ้น ความหนาของ Load beam บางลง และออกแบบส่วนอื่นเพิ่มเติม ได้แก่ การมี Roof ที่ Load
beam หรือมี Limiter ที่ Gimbal เพื่อช่วยควบคุมการเคลื่อนไหวของ Gimbal ให้มีความเร็วตกกระทบ
ของหัวอ่าน/เขียนต่ำลงในขณะที่อยู่ในสภาวะชอร์เกินระดับค่า G-to-Lift off และ เกิด Head Slap

ความน่าเชื่อถือของข้อมูลจากไฟไนอีลีเมนต์ในเชิงดูแนวโน้มการออกแบบของแขนจับหัวอ่าน/
เขียนสามารถเชื่อถือได้เนื่องจากได้ข้อสรุปเหมือนกับที่ได้จากการทดลองแต่ในเชิงปริมาณไม่สามารถ
เชื่อถือได้เนื่องจากข้อมูลที่ได้จากไฟไนอีลีเมนต์มีค่าสูงกว่าการทดสอบผลิตภัณฑ์ต้นแบบจริงอย่างมี
นัยสำคัญ

ภาควิชา วิศวกรรมอุตสาหการ

สาขาวิชา วิศวกรรมอุตสาหการ

ปีการศึกษา 2546

ลายมือชื่อนิสิต..... Decho B.

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

4471413721 : MAJOR INDUSTRY ENGINEERING

KEYWORD : SUSPENSION IN HARD DISK DRIVE / 2^k FACTORIAL DESIGN / G-TO-LIFT OFF / SHOCK PULSE DURATION / RESONANCE SWAY FREQUENCY

DECHO BOONKRONG : FACTORIAL EXPERIMENTAL DESIGN FOR STUDYING THE EFFECTS OF SUSPENSION IN HARD DISK DRIVE.

THESIS ADVISOR : DR.NAPASSAVONG OSOTHSILP., 185 PP. ISBN 974-17-3843-9

The objectives of this research are to study the main effects and interaction effects of four factors of suspension with 14.5 mm base plate on the responses which are G-to-Lift off value under two shock pulse durations: 0.1 ms and 0.35 ms, and the resonance sway frequency. This research studies four factors which are the ratio of spring length of hinge to total length (L_1/L_{total}), hinge thickness (t_1), spring width of hinge (W) and load beam thickness (t_2). This research then finds the levels of the four factors that maximize all responses. In addition, this research studies the relationship between G-to-Lift off value and head impact velocity under the condition above G-to-Lift off value in order to provide insight for design review. Finally this research studies the reliability of the finite element model in predicting the G-to-Lift off value by comparing the predicted value from the model with the actual data from the experiment. The 2^k factorial design and the regression analysis are used in this research.

It is concluded that the guidelines for the design of suspension to increase its shock resistance performance and the resonance sway frequency are increasing spring length of Hinge (increase L_1/L_{total}), increasing Hinge thickness (t_1), increasing spring width of Hinge (W), and reducing load beam thickness (t_2). Further suggestions for the design are adding the load beam roof or Gimbal limiter for controlling the head velocity while the suspension is staying in high shock condition and head is slapping.

Reliability of the finite element model in predicting the effects of the design factors is satisfactory. It gives the same conclusion as using the actual data from the experiment. However, in terms of the value prediction there is a need for model improvement since the predicted values are significantly higher than the actual data.

Department Industrial Engineering

Field of study Industrial Engineering

Academic year 2003

Student's signature.....*Decho B.*.....

Advisor's signature.....*NJS*.....

Co-advisor's signature.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ ผู้ทำวิจัยขอขอบพระคุณ ดร.นภัศรดวงศ์ ไอสถศิลาปี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้ชี้แนะและให้คำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์

กราบขอบพระคุณ รศ.ดร.วันชัย วิจิรวณิช ประธานกรรมการ รศ.ดร.สมชาย พัวจินดาเนตร และ ดร.วิภาวี ธรรมมาภรณ์พิลาศ กรรมการ ที่ช่วยเหลือให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ และตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบคุณเพื่อนร่วมงานที่ช่วยให้ข้อมูลและระดมความคิดเห็นในการทำการวิจัยตลอดจนพนักงานในโรงงานที่ให้ความร่วมมือ

นอกจากนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ครูอาจารย์ พี่น้อง เพื่อนนิสิต และท่านที่ไม่ได้กล่าวไว้ในที่นี้ที่กรุณาให้ความช่วยเหลือและให้กำลังใจแก่ผู้ทำวิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

ท้ายนี้หวังว่าวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นประโยชน์สำหรับผู้ที่สนใจที่จะนำไปเป็นแนวทางการประยุกต์ใช้ปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ต่อไป

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ต
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ผลลัพธ์และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	7
1.5 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน.....	8
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	9
2.1 การออกแบบการทดลองและการวิเคราะห์การทดลองเชิงสถิติ.....	9
2.2 Gage Repeatability and Reproducibility (GR&R).....	23
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติด้านทานชอร์คของแขนจับหัวอ่าน/เขียน.....	24
บทที่ 3 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับแขนจับหัวอ่าน/เขียน ชอร์ค และความถี่ธรรมชาติ.....	30
3.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับแขนจับหัวอ่าน/เขียน (Suspension).....	30
3.2 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับชอร์ค.....	33
3.3 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับความถี่ธรรมชาติของแขนจับหัวอ่าน/เขียน (Resonance).....	43
บทที่ 4 การออกแบบการทดลอง.....	45
4.1 กำหนดปัญหาที่สนใจ.....	45
4.2 การเลือกปัจจัยและระดับที่จะทำการศึกษา.....	46
4.3 เลือกออกแบบการทดลอง.....	52
4.4 เลือกขนาดตัวอย่างที่เหมาะสม (Sample Size) หรือจำนวนทำซ้ำ (Replicates).....	52
4.5 ออกแบบการทดลอง.....	54
4.6 ทำการทดลองและเก็บข้อมูล.....	58
4.7 วิเคราะห์ผลเชิงสถิติ.....	58
4.8 ตรวจสอบความเพียงพอของแบบจำลอง (Model Adequacy Checking).....	63

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.9 สรุปผล.....	63
4.10 สรุป.....	63
บทที่ 5 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	66
5.1 เตรียมผลิตภัณฑ์ต้นแบบ.....	66
5.2 เตรียมเครื่องทดสอบคุณสมบัติการต้านทานชอร์กและกำหนดของผลิตภัณฑ์	71
5.3 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง.....	73
บทที่ 6 ผลการทดลองและการวิเคราะห์.....	75
6.1 G-to-Lift off ที่ Shock Pulse Duration 0.1 ms.....	76
6.2 G-to-Lift off ที่ Shock Pulse Duration 0.35 ms.....	84
6.3 อิทธิพลของสภาวะ Shock Pulse Duration ที่เกิดขึ้นต่อสภาวะของปัจจัยที่ทำให้ ...	93
ความสามารถของค่า G-to-Lift off สูงสุด	
6.4 ความถี่ธรรมชาติในโหมดสเวย์เมื่อเกิดกำหนด (Sway Frequency).....	103
6.5 ผลของการออกแบบแขนจับหัวอ่าน/เขียนเมื่อคำนึงถึงผลตอบเพียง 1 ผลตอบ.....	112
(G-to-Lift off ที่ Shock Pulse Duration 0.1 ms หรือ G-to-Lift off	
ที่ Shock Pulse Duration 0.35 ms หรือ ความถี่ธรรมชาติในโหมดสเวย์)	
6.6 วิเคราะห์หาจุดสมดุลของแต่ละปัจจัยของผลิตภัณฑ์ต้นแบบที่ทำให้ทุก ๆ	114
ผลตอบมีค่าสูงที่สุด (Maximize All Response)	
6.7 ศึกษาความสัมพันธ์เชิงสถิติระหว่างความเร็วของหัวอ่าน/เขียนขณะตก.....	117
กระทบบนแผ่นดิสก์กับค่า G-to-Lift off ของแขนจับหัวอ่าน/เขียน เมื่อแขน	
จับหัวอ่าน/เขียนอยู่ในสภาวะชอร์กระดับเกินค่า G-to-Lift off	
6.8 สรุป	141
บทที่ 7 ผลจากไฟไนต์อีลีเมนต์ (Finite Element Model).....	143
7.1 ขั้นตอนการทำไฟไนต์อีลีเมนต์.....	143
7.2 วิเคราะห์ผลการคำนวณ.....	147
7.3 เปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้จากการคำนวณโดยไฟไนต์อีลีเมนต์กับการทดสอบ..	155
ผลิตภัณฑ์ต้นแบบจริง	
7.4 สรุป.....	161
บทที่ 8 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	162
8.1 สรุปผลการวิจัย.....	162

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
8.2 ข้อจำกัดในงานวิจัย.....	171
8.3 ข้อเสนอแนะ.....	171
รายการอ้างอิง.....	174
ภาคผนวก.....	175
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	185



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 การตัดสินใจในการทดสอบสมมติฐาน.....	13
2.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับ One-Way ANOVA.....	15
2.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับ Two-Factor Fixed Effect Model.....	16
2.4 ขั้นตอนการวิเคราะห์สำหรับการออกแบบ 2^k	18
2.5 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการออกแบบ 2^k	19
2.6 แสดงตัวอย่างของข้อมูล Gage R&R.....	24
4.1 แสดงเหตุผลการวิเคราะห์เลือกและไม่เลือกแต่ละปัจจัยที่จะนำไปศึกษา.....	48
4.2 ปัจจัยและระดับของปัจจัยที่ทำการศึกษา.....	52
4.3 แสดงข้อมูลประมาณค่า Sigma.....	53
4.4 แสดงตารางการออกแบบการทดลอง.....	55
4.5 แผนการออกแบบการทดลอง.....	64
5.1 แสดงรูปแบบภาพและขนาดของปัจจัยที่เปลี่ยนไปของ Hinge.....	66
5.2 แสดงรูปแบบภาพและขนาดของปัจจัยที่เปลี่ยนไปของ Load beam.....	66
5.3 แสดงขนาดของปัจจัยของผลิตภัณฑ์ต้นแบบทั้ง 16 รูปแบบ.....	67
5.4 แสดงผล Gage R&R ของ G-to-Lift off ที่สภาวะ Shock Pulse Duration 0.1 ms.....	71
5.5 แสดงผล Gage R&R ของ G-to-Lift off ที่สภาวะ Shock Pulse Duration 0.35 ms.....	72
5.6 แสดงผล Gage R&R ของเครื่องทดสอบความถี่ธรรมชาติในโหมดสเวย์.....	72
5.7 แสดงลำดับการทดสอบของผลิตภัณฑ์ต้นแบบ.....	73
6.1 แสดงผลการทดลองของ G-to-Lift off ที่ Shock Pulse Duration 0.1 ms.....	76
6.2 ตาราง ANOVA แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนขั้นต้น.....	78
6.3 สรุปอิทธิพลของแต่ละพจน์ต่อความผันแปรของ G-to-Lift off ที่ Shock Pulse Duration 0.1 ms (%Contribution).....	79
6.4 ตาราง ANOVA แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนเมื่อลดรูปโมเดล.....	80
6.5 สรุประดับของแต่ละปัจจัยที่ส่งผลให้ G-to-Lift off ที่ Shock Pulse Duration 0.1 ms สูงสุด.....	82
6.6 แสดงผลการทดลองของ G-to-Lift off ที่ Shock Pulse Duration 0.35 ms.....	84
6.7 ตาราง ANOVA แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนขั้นต้น.....	86
6.8 สรุปอิทธิพลของแต่ละพจน์ต่อความผันแปรของ G-to-Lift off ที่ Shock Pulse Duration 0.35 ms (%Contribution).....	87
6.9 ตาราง ANOVA แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนเมื่อลดรูปโมเดล.....	88

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
6.10	91
6.10 สรุประดับของแต่ละปัจจัยที่ส่งผลให้ G-to-Lift off ที่ Shock Pulse Duration..... 0.35 ms สูงสุด	
6.11	93
6.11 แสดงตารางการออกแบบการทดลองเมื่อให้ Shock Pulse Duration (PD) เป็นปัจจัยที่ 5..	
6.12	97
6.12 ตาราง ANOVA แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนขั้นต้น.....	
6.13	100
6.13 ตาราง ANOVA แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนเมื่อลดรูปโมเดล.....	
6.14	102
6.14 แสดงสถานะของปัจจัยที่ทำให้ความสามารถของค่า G-to-Lift off สูงสุดในสถานะ..... Shock Pulse Duration 0.1, 0.2 และ 0.35 ms	
6.15	103
6.15 แสดงผลการทดลองของความถี่ธรรมชาติในโหมดสเวย์ (Sway Frequency).....	
6.16	105
6.16 ตาราง ANOVA แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนขั้นต้น.....	
6.17	106
6.17 สรุพอิทธิพลของแต่ละพจน์ต่อความผันแปรของความถี่ธรรมชาติในโหมดสเวย์ (%Contribution)	
6.18	107
6.18 ตาราง ANOVA แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนเมื่อลดรูปโมเดล	
6.19	110
6.19 สรุประดับของแต่ละปัจจัยที่ส่งผลให้ความถี่ธรรมชาติในโหมดสเวย์..... (Sway Frequency) สูงสุด	
6.20	112
6.20 แสดงขนาดที่สูงสุดของผลตอบที่สนใจ 1 ผลตอบและขนาดของผลตอบอื่น..... ที่เปลี่ยนไปตามขนาดของปัจจัยที่กำหนดให้กับผลตอบที่สนใจนั้นๆ	
6.21	113
6.21 แสดงแนวโน้มของแต่ละปัจจัยเมื่อผลตอบแต่ละตัวเป็นอิสระต่อกัน.....	
6.22	115
6.22 แสดงผลวิเคราะห์ของ Response Optimization.....	
6.23	115
6.23 สรุประดับของปัจจัยและขนาดของผลตอบที่ดีที่สุดเมื่อคำนึงถึงทุกผลตอบ.....	
6.24	115
6.24 แสดงค่าพยากรณ์เปรียบเทียบของผลตอบเมื่อพิจารณาอิสระต่อกัน..... กับพิจารณาทุกผลตอบร่วมกัน	
6.25	119
6.25 แสดงความเร็วตกกระทบของหัวอ่าน/เขียนและค่า G-to-Lift off ของผลิตภัณฑ์ ต้นแบบแต่ละรูปแบบ	
6.26	120
6.26 แสดงผลวิเคราะห์ความแปรปรวน.....	
6.27	125
6.27 ตาราง ANOVA แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนเมื่อลดรูปโมเดล.....	
6.28	130
6.28 สรุปลความสัมพันธ์เชิงสถิติระหว่างระหว่างความเร็วตกกระทบของหัวอ่าน/เขียนกับค่า.... G-to-Lift off เมื่อจัดกลุ่มตามระดับของแต่ละปัจจัย	
6.29	131
6.29 แสดงความเร็วตกกระทบของหัวอ่าน/เขียนและค่า G-to-Lift off ของผลิตภัณฑ์..... ต้นแบบแต่ละรูปแบบ	

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
6.30 แสดงผลวิเคราะห์ความแปรปรวน.....	132
6.31 สรุปความสัมพันธ์เชิงสถิติระหว่างระหว่างความเร็วตกกระทบของหัวอ่าน/เขียนกับค่า.....	140
G-to-Lift off เมื่อจัดกลุ่มตามระดับของแต่ละปัจจัย	
7.1 แสดงค่า G-to-Lift off ที่ Shock Pulse Duration 0.1 ms และ 0.35 ms.....	147
ของแบบจำลองแต่ละรูปแบบจากโปรแกรมไฟไนต์อีลีเมนต์	
7.2 ตาราง ANOVA แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนเมื่อลดรูปโมเดล.....	149
7.3 สรุปอิทธิพลของผลหลักแต่ละปัจจัยต่อความผันแปรของ G-to-Lift off ที่ Shock Pulse	149
Duration 0.1 ms (%Contribution)	
7.4 ตาราง ANOVA แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนเมื่อลดรูปโมเดล	152
7.5 สรุปอิทธิพลของผลหลักแต่ละปัจจัยต่อความผันแปรของ G-to-Lift off ที่ Shock Pulse.....	152
Duration 0.35 ms (%Contribution)	
7.6 แสดงผลวิเคราะห์ของ Response Optimization	154
7.7 สรุประดับของปัจจัยและขนาดของผลตอบที่ดีที่สุดเมื่อคำนึงถึง.....	154
G-to-Lift off ที่ Shock Pulse Duration 0.1 ms และ 0.35 ms	
7.8 แสดงผลวิเคราะห์ของ Response Optimization.....	155
7.9 สรุประดับของปัจจัยและขนาดของผลตอบที่ดีที่สุดเมื่อคำนึงถึง.....	155
G-to-Lift off ที่ Shock Pulse Duration 0.1 ms และ 0.35 ms	
7.10 สรุปเปรียบเทียบแนวโน้มการออกแบบแขนจับหัวอ่าน/เขียนเพื่อให้ได้ค่า G-to-Lift off.....	156
สูงจากข้อมูลที่คำนวณโดยไฟไนต์อีลีเมนต์กับการทดสอบผลิตภัณฑ์ต้นแบบจริง	
7.11 แสดงค่า G-to-Lift off ที่ได้จากการคำนวณโดยไฟไนต์อีลีเมนต์และการทดสอบ.....	157
ผลิตภัณฑ์ต้นแบบจริง	
7.12 แสดงผลการทดสอบค่าเฉลี่ยแบบ Two-Sample T-Test.....	158
7.13 แสดงความแตกต่างของวิธีการที่ประยุกต์ให้กับไฟไนต์อีลีเมนต์กับการ.....	159
ทดสอบผลิตภัณฑ์จริง	
8.1 แสดงแนวโน้มของแต่ละปัจจัยที่ทำให้ G-to-Lift off ที่ Shock Pulse Duration.....	164
0.1 ms และ 0.35 ms มีค่าสูงขึ้น	
8.2 แสดงค่า G-to-Lift off ของผลิตภัณฑ์ต้นแบบที่ Shock Pulse Duration 0.1 ms	165
และ 0.35 ms	
8.3 สรุปแนวโน้มของแต่ละปัจจัยที่ส่งผลให้ความถี่ธรรมชาติในโหมดสเวียร์สูงขึ้น.....	166

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
8.4 แสดงขนาดของความถี่ธรรมชาติในโหมดสเวย์ (Sway Frequency.....166 เมื่อออกแบบให้แขนจับหัวอ่าน/เขียนมีค่า G-to-Lift off สูงสุด	166
8.5 แสดงแนวโน้มของแต่ละปัจจัยเมื่อต้องการให้ทุกผลตอบมีค่ามากที่สุด.....167	167
8.6 แสดงค่าพยากรณ์เปรียบเทียบของผลตอบเมื่อพิจารณาอิสระต่อกันกับพิจารณา.....168 ทุกผลตอบร่วมกัน	168
8.7 สรุปเปรียบเทียบแนวโน้มการออกแบบแขนจับหัวอ่าน/เขียนเพื่อให้ได้ค่า G-to-Lift off.....170 สูง จากข้อมูลที่คำนวณโดยไฟไนต์อีลีเมนต์กับการทดสอบผลิตภัณฑ์ต้นแบบจริง	170
8.8 สรุปเปรียบเทียบขนาดของค่า G-to-Lift off ที่คำนวณโดยไฟไนต์อีลีเมนต์กับการทดสอบ.....170 ผลิตภัณฑ์ต้นแบบจริง	170
8.9 แสดงชนิดของฮาร์ดดิสก์ที่ตรงกับสภาวะ Shock Pulse Duration ที่อาจเกิดขึ้น.....171	171
8.10 แสดงแนวโน้มของแต่ละปัจจัย.....173	173

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1.1 แสดงแกนจับหัวอ่าน/เขียน หัวอ่าน/เขียน กระทำอยู่บนแผ่นดิสก์.....	1
1.2 ลักษณะของชอริกขาเข้า.....	2
1.3 แสดงลักษณะของผลิตภัณฑ์ต้นแบบที่ทำการศึกษา.....	4
2.1 แสดงกราฟการตรวจสอบการแจกแจงปกติและค่าสถิติ Anderson-darling.....	22
2.2 แสดงกราฟการตรวจความเป็นอิสระของข้อมูล.....	22
2.3 แสดงกราฟการตรวจความเสถียรภาพของความแปรปรวน.....	23
2.4 แสดงแกนจับหัวอ่าน/เขียนที่มีปลายกว้างต่างกัน.....	25
2.5 แสดงแกนจับหัวอ่าน/เขียนที่มีความยาวต่างกัน.....	25
2.6 แสดงแกนจับหัวอ่าน/เขียนที่มีจุดศูนย์กลางมวลต่างกัน.....	26
2.7 แสดงรูปแบบของแกนจับหัวอ่าน/เขียนและผลการทดลอง.....	26
2.8 แกนจับหัวอ่าน/เขียนและ 8 พารามิเตอร์ที่ศึกษาโดยประยุกต์วิธีทากูชิ.....	27
2.9 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วสัมพัทธ์กับความเค้นเฉือน.....	28
2.10 รูปแบบแกนจับหัวอ่าน/เขียนที่ทำการทดสอบ.....	29
3.1 ตัวอย่างแกนจับหัวอ่าน/เขียนแบบต่างๆ.....	30
3.2 แกนจับหัวอ่าน/เขียนแบบเบสเพลต.....	31
3.3 แกนจับหัวอ่าน/เขียนแบบยูนิเม้า.....	31
3.4 ขั้นตอนการผลิตแกนจับหัวอ่าน/เขียน.....	32
3.5 ลักษณะของ Shock Pulse Duration.....	33
3.6 แสดงลักษณะหัวอ่าน/เขียนขณะเกิด Head Slap.....	34
3.7 Drop tester แบบที่ 1.....	35
3.8 Drop tester แบบที่ 2.....	35
3.9 Impact tester.....	36
3.10 เครื่องทดสอบชอริกของบริษัทตัวอย่าง.....	36
3.11 การปล่อยวัตถุอย่างอิสระ.....	37
3.12 Half Sine Shock แสดงในรูปความเร่งกับเวลา.....	38
3.13 Half Cosine Shock แสดงในรูปความเร็วกับเวลา.....	39
3.14 แสดงแบบจำลองการทดสอบ Drop Shock ซึ่งประกอบด้วย Cushioned Package ,.....	42
Rigid Product และ Accelerometer	
3.15 แสดงคานแบบปลายอิสระและรูปคลื่นเมื่อเกิดการสั่น.....	43

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.16 แสดงสเวย์โหมด (Sway mode).....	44
4.1 แสดงส่วนประกอบของแขนจับหัวอ่าน/เขียนรูปแบบพื้นฐานและปัจจัยเริ่มต้นที่ศึกษา.....	46
4.2 แสดงรูปแบบของผลิตภัณฑ์ต้นแบบและปัจจัยที่ศึกษา.....	50
4.3 แสดงหน้าต่างการหาขนาดตัวอย่างของการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k ...	53
5.1 แสดงรูปแบบภาพเขียนของผลิตภัณฑ์ต้นแบบ.....	67
5.2 แสดงกระบวนการเชื่อมประกอบด้วยแสงเลเซอร์.....	68
5.3 แสดงผลิตภัณฑ์ต้นแบบก่อนและหลังขึ้นรูปค่าสปริง.....	68
5.4 แสดงเครื่องล้าง APC	69
5.5 แสดงเครื่องปรับค่าสปริงแบบละเอียด	69
5.6 แสดงเครื่องตัดขาและแยกแยะกลุ่มงานดีงานเสีย	70
6.1 กราฟพาเรโตแสดงลำดับของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อ G-to-Lift off	78
6.2 ผลหลักของแต่ละปัจจัย	81
6.3 อันตรกิริยา 2 ทางของแต่ละคู่ปัจจัย.....	81
6.4 แสดงกราฟการตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบ	83
6.5 กราฟพาเรโตแสดงลำดับของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อ G-to-Lift off	86
6.6 ผลหลักของแต่ละปัจจัย.....	89
6.7 อันตรกิริยา 2 ทางของแต่ละคู่ปัจจัย.....	90
6.8 แสดงกราฟการตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบ.....	91
6.9 กราฟพาเรโตแสดงลำดับของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อ G-to-Lift off.....	98
6.10 แสดงกราฟการตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบ.....	101
6.11 กราฟพาเรโตแสดงลำดับของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความถี่ธรรมชาติในโหมดสเวย์ (Sway Frequency)	105
6.12 ผลหลักของแต่ละปัจจัย.....	108
6.13 อันตรกิริยา 2 ทางของแต่ละคู่ปัจจัย.....	109
6.14 แสดงกราฟการตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบ.....	110
6.15 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับเวลาของผลเฉลี่ย.....	119
ของความเร็วของหัวอ่าน/เขียนขณะเคลื่อนที่	

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
6.16 แสดงความสัมพันธ์เชิงสถิติระหว่างความเร็วตกกระทบของหัวอ่าน/เขียน กับค่า G-to-Lift off ของผลิตภัณฑ์ต้นแบบ	120
6.17 แสดงกราฟจุดความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วตกกระทบของหัวอ่าน/เขียน..... กับค่า G-to-Lift off โดยจัดกลุ่มตามความหนาของ Load beam (t_2)	121
6.18 แสดงกราฟจุดความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วตกกระทบของหัวอ่าน/เขียน..... กับความหนาของ Load beam (t_2) ที่เปลี่ยนระดับไป	121
6.19 แสดงกราฟจุดความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วตกกระทบของหัวอ่าน/เขียน กับค่า G-to-Lift off โดยจัดกลุ่มตามความหนาของ Hinge (t_1)	122
6.20 แสดงกราฟจุดความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วตกกระทบของหัวอ่าน/เขียน..... กับความหนาของ Hinge (t_1) ที่เปลี่ยนระดับไป	122
6.21 แสดงกราฟจุดความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วตกกระทบของหัวอ่าน/เขียนกับค่า..... G-to-Lift off โดยจัดกลุ่มตามความกว้างของ Hinge บริเวณที่มีคุณสมบัติคล้ายสปริง (W)	123
6.22 แสดงกราฟจุดความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วตกกระทบของหัวอ่าน/เขียน..... กับความกว้างของ Hinge บริเวณที่มีคุณสมบัติคล้ายสปริง (W)	123
6.23 แสดงกราฟจุดความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วตกกระทบของหัวอ่าน/เขียน..... กับค่า G-to-Lift off โดยจัดกลุ่มตามอัตราส่วนของ L_1/L_{total}	124
6.24 แสดงกราฟจุดความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วตกกระทบของหัวอ่าน/เขียน..... กับอัตราส่วนของ L_1/L_{total}	124
6.25 กราฟพาเรโตแสดงลำดับของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความเร็วตกกระทบ..... ของหัวอ่านเขียนเมื่อลดรูปโมเดล	125
6.26 ผลหลักของแต่ละปัจจัย.....	126
6.27 อันตรกิริยา 2 ทางของแต่ละคู่ปัจจัย.....	127
6.28 Velocity vs G-to-Lift off by $t_2 = 0.076$ mm.....	128
6.29 Velocity vs G-to-Lift off by $t_2 = 0.120$ mm.....	128
6.30 Velocity vs G-to-Lift off by $t_1 = 0.030$ mm.....	128
6.31 Velocity vs G-to-Lift off by $t_1 = 0.038$ mm.....	128
6.32 Velocity vs G-to-Lift off by $L_1/L_{total} = 0.037$ mm.....	129
6.33 Velocity vs G-to-Lift off by $L_1/L_{total} = 0.078$ mm.....	129

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
6.34 Velocity vs G-to-Lift off by $W = 0.600$ mm.....	129
6.35 Velocity vs G-to-Lift off by $W = 0.600$ mm.....	129
6.36 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับเวลาของผลเฉลี่ย.....	131
ของความเร็ของหัวอ่าน/เขียนขณะเคลื่อนที่	
6.37 แสดงความสัมพันธ์เชิงสถิติระหว่างความเร็วตกกระทบของหัวอ่าน/เขียน.....	132
กับค่า G-to-Lift off ของผลิตภัณฑ์ต้นแบบ	
6.38 แสดงกราฟจุดความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วตกกระทบของหัวอ่าน/เขียน.....	133
กับค่า G-to-Lift off โดยจัดกลุ่มตามความหนาของ Load beam (t_2)	
6.39 แสดงกราฟจุดความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วตกกระทบของหัวอ่าน/เขียน.....	133
กับความหนาของ Load beam (t_2) ที่เปลี่ยนระดับไป	
6.40 แสดงกราฟจุดความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วตกกระทบของหัวอ่าน/เขียน	134
กับค่า G-to-Lift off โดยจัดกลุ่มตามความหนาของ Hinge (t_1)	
6.41 แสดงกราฟจุดความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วตกกระทบของหัวอ่าน/เขียน.....	134
กับความหนาของ Hinge (t_1) ที่เปลี่ยนระดับไป	
6.42 แสดงกราฟจุดความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วตกกระทบของหัวอ่าน/เขียนกับค่า.....	135
G-to-Lift off โดยจัดกลุ่มตามความกว้างของ Hinge บริเวณที่มีคุณสมบัติคล้ายสปริง (W)	
6.43 แสดงกราฟจุดความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วตกกระทบของหัวอ่าน/เขียน.....	135
กับความกว้างของ Hinge บริเวณที่มีคุณสมบัติคล้ายสปริง (W)	
6.44 แสดงกราฟจุดความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วตกกระทบของหัวอ่าน/เขียน.....	136
กับค่า G-to-Lift off โดยจัดกลุ่มตามอัตราส่วนของ L_1/L_{total}	
6.45 แสดงกราฟจุดความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วตกกระทบของหัวอ่าน/เขียน.....	136
กับอัตราส่วนของ L_1/L_{total}	
6.46 กราฟพาเรโตแสดงลำดับของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความเร็วตกกระทบ.....	137
ของหัวอ่านเขียนเมื่อลดรูปโมเดล	
6.47 ผลหลักของแต่ละปัจจัย.....	137
6.48 Velocity vs G-to-Lift off by $t_2 = 0.076$ mm.....	138
6.49 Velocity vs G-to-Lift off by $t_2 = 0.120$ mm.....	138
6.50 Velocity vs G-to-Lift off by $t_1 = 0.030$ mm.....	139
6.51 Velocity vs G-to-Lift off by $t_1 = 0.038$ mm.....	139

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
6.52 Velocity vs G-to-Lift off by $L_1/L_{total} = 0.037$ mm.....	139
6.53 Velocity vs G-to-Lift off by $L_1/L_{total} = 0.078$ mm.....	139
6.54 Velocity vs G-to-Lift off by $W = 0.600$ mm.....	139
6.55 Velocity vs G-to-Lift off by $W = 0.600$ mm.....	139
6.56 แสดงรูปลักษณะของ Roof และ Limiter.....	142
7.1 แสดงตัวอย่างแบบจำลองที่ถูกสร้างขึ้นโดยโปรแกรม MSC.PATRAN.....	144
7.2 แสดงตัวอย่างแบบจำลองที่ถูกขึ้นรูปแล้วในสภาวะ Free-State.....	145
7.3 แสดงรูปร่างและขนาดของแรงชอร์คเริ่มต้น.....	146
7.4 แสดงทิศทางของแรงชอร์คที่กระทำบนแบบจำลอง.....	146
7.5 กราฟพาเรโตแสดงลำดับของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อ G-to-Lift off	148
7.6 ผลหลักของแต่ละปัจจัย.....	150
7.7 กราฟพาเรโตแสดงลำดับของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อ G-to-Lift off.....	151
7.8 ผลหลักของแต่ละปัจจัย.....	153
7.9 แสดง Dot Plots ของค่า G-to-Lift off ที่ได้จากการคำนวณโดยไฟไนต์อีลิเมนต์.....	158
และการทดสอบผลิตภัณฑ์ต้นแบบจริง	
8.1 แสดงลักษณะของผลิตภัณฑ์ต้นแบบที่ทำการศึกษา.....	162